

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Snižování spotřeby dusíku při řezání laserem

**Reducing the Consumption of Nitrogen during Laser
Cutting**

Student: Bc. Milan Halamka

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milan Halamka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 10 Technologický management
Téma: Snižování spotřeby dusíku při řezání laserem
Reducing the Consumption of Nitrogen during Laser Cutting
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současných nekonvenčních technologií řezání.
2. Zhodnocení a rozbor technologie řezání laserem.
3. Aplikace technologie řezání laserem v daném výrobním prostředí.
4. Návrh snížení spotřeby dusíku v daném výrobním prostředí.
5. Zhodnocení a rozbor dosažených výsledků návrhu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SADÍLEK, M. *Nekonenční metody obrábění I*. VŠB – TU Ostrava, 2009, 152 s., ISBN 978-80-248-2107-8.
[2] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Technická univerzita Košice, Viena, Košice, 2000, ISBN 80-7099-430-4.
[3] EL-HOFY, H. *Advanced Machining Processes – Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. The McGraw-Hill Companies, 2005, ISBN 0-07-145334-2.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petruš, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta.

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22.6.2015.....

Milan Halamka

Milan Halamka

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložena vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

21.4.2016

Milan Halamka

Bc.Milan Halamka

Trstěnická 968 Litomyšl 570 01

Anotace diplomové práce

HALAMKA, M. *Snížování spotřeby dusíku při řezání laserem: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB -Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2015, 76 s. Vedoucí práce: SADÍLEK, M.

Diplomová práce se zabývá snížením spotřeby dusíku při dělení korozivzdorných plechů laserem. V úvodu je popsán princip a jednotlivé způsoby laserového řezání. Následuje ekonomické zhodnocení procesu při použití kvalitativně odlišných plynů z tlakových lahví, při dodávce plynu z kryogenní nádoby a z vyvíječe dusíku. Dalším prostředkem k nalezení finanční úspory je postupné nastavení šesti řezných parametrů a vyhodnocení jejich vlivu na konečnou spotřebu dusíku. Praktická část poskytuje i návod, jak vypočítat spotřebu plynu ještě před začátkem řezání. Výsledkem práce je nalezení optimálních řezných podmínek, za použití menšího množství plynu vzhledem k původnímu nastavení.

HALAMKA, M. Reducing the Consumption of Nitrogen during Laser Cutting: *Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2015, 76 p, Thesis head: SADÍLEK. M

The diploma thesis deals with the topic of reducing the consumption of nitrogen during laser cutting of corrosion-proof sheet metals. In the introduction the principles and individual types of laser cutting are described. This is followed by the economic analysis of the process when using qualitatively different gases from pressure cylinders, from a cryogenic vessel and from a nitrogen generator. Another means of finding economic savings is the step-by-step setting of six cutting parameters and the evaluation of their impact on the final nitrogen consumption. The practical part includes the guidelines how to calculate the gas consumption already before cutting. The output of the thesis is the identification of the optimal cutting conditions while using a smaller amount of gas in comparison to the original setting.

Obsah

1 ÚVOD	6
2. PODSTATA LASERU	7
2.1 HISTORIE LASERU	8
2.2 PRINCIP VZNIKU LASERU NA ÚROVNI ATOMU	8
2.2.1 PODMÍNKY NUTNÉ KE VZNIKU LASEROVÉHO ZÁŘENÍ	9
2.2.2 FÁZE VZNIKU LASEROVÉHO PAPRSKU	10
2.3 CHARAKTERISTIKA LASEROVÉHO PAPRSKU	11
2.3.1 VLNOVÁ DÉLKA	11
2.3.2 DIVERGENCE	11
2.3.3 PRŮMĚR PAPRSKU	11
2.3.4 VÝKON PAPRSKU	13
2.3.5 POLARIZACE PAPRSKU	13
2.3.6 ROZDĚLENÍ HUSTOTY ENERGIE V PŘÍČNÉM PRŮŘEZU	14
2.4 KVALITA SVAZKU	16
3 ROZDĚLENÍ LASERŮ	17
3.1 ROZDĚLENÍ PODLE AKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ	17
3.1.1 PLYNOVÉ LASERY	17
3.1.2 KAPALINOVÉ LASERY	17
3.1.3 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	17
3.1.4 POLOVODIČOVÉ LASERY	18
3.2 ROZDĚLENÍ PODLE TYPU BUZENÍ	18
3.2.1 OPTICKÉ BUZENÍ	18
3.2.2 BUZENÍ ELEKTRICKÝM VÝBOJEM	18
3.2.3 BUZENÍ ELEKTRICKÝM PROUDEM	18
3.2.4 CHEMICKÁ EXCITACE	18
3.3 ROZDĚLENÍ PODLE VLNOVÉ DÉLKY ZÁŘENÍ	19
3.4 ROZDĚLENÍ PODLE DÉLKY IMPULSU PAPRSKU	19
3.4.1 KONTINUÁLNÍ REŽIM	19
3.4.2 PULZNÍ REŽIM	19
3.4.3 REŽIM ULTRAKRÁTKÝCH PULZŮ	20
3.4.4 Q-SPÍNÁNÍ	20
3.5 ROZDĚLENÍ PODLE TYPU KVANTOVÝCH PŘECHODŮ	20
4 CO₂ LASER	21
4.1 PRINCIP CO ₂ LASERU	21
4.2 ROZDĚLENÍ CO ₂ LASERU PODLE ČERPÁNÍ PLYNU	21
4.2.1 TYP S PODÉLNÝM PROUDĚNÍM PLYNU (FAST AXIAL FLOW)	22
4.2.2 TYP S PŘÍČNÝM PROUDĚNÍM (CROSS FLOW)	22
4.2.3 DESKOVÝ SLAB LASER	23
4.3 KONSTRUKCE CO ₂ LASERU S PODÉLNÝM PROUDĚNÍM, BUZENÍ ELEKTRICKÝM IMPULZEM	23

5 ŘEZÁNÍ (DĚLENÍ) MATERIÁLŮ CO₂ LASEREM	25
5.1 TAVNÉ VYSOKOTLAKÉ ŘEZÁNÍ	26
5.1.1 Dusík	27
5.1.2 ARGON	28
5.1.3 HELIUM	29
5.2 OXIDAČNÍ NÍZKOTLAKÉ ŘEZÁNÍ	29
5.2.1 KYSLÍK	30
5.3 SUBLIMAČNÍ ŘEZÁNÍ	30
6 VLASTNOSTI MATERIÁLU	31
6.1 VLASTNOSTI TEPELNĚ - FYZIKÁLNÍ	31
6.1.1 REFLEKTIVITA (ODRAZIVOST POVRCHU)	31
6.1.2 ABSORPCE	31
6.1.3 TEPELNÁ VODIVOST	32
6.1.4 PLOŠNÉ NAPĚTÍ A VIZKOZITA ROZTAVENÉHO KOVU	32
6.2 CHEMICKÉ SLOŽENÍ	32
7 VYHODNOCENÍ ŘEZŮ PROVEDENÝCH LASEREM	34
7.1 NORMA ČSN EN ISO 9013	34
7.1.1 ÚCHYLKY TVARU A POLOHY	34
7.1.2 ROZMĚROVÉ ÚCHYLKY	35
7.1.3 STANOVENÍ JAKOSTI POVRCHU ŘEZU	35
7.1.4 ZNAČENÍ JAKOSTI POVRCHU NA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACI	39
7.2 POSOUZENÍ KVALITY ŘEZU MIMO NORMU 9013	39
8 ÚSPORA PŘI NÁKUPU A SKLADOVÁNÍ DUSÍKU	40
8.1 SNÍŽENÍ NÁKLADŮ VÝHODNĚJŠÍM NÁKUPEM	41
8.2 SNÍŽENÍ NÁKLADŮ POUŽITÍM DUSÍKU NIŽŠÍ TŘÍDY ČISTOTY	42
8.3 SNÍŽENÍ NÁKLADŮ ODBĚREM DUSÍKU Z KRYOGENNÍ NÁDOBY	42
8.4 SNÍŽENÍ NÁKLADŮ POMOCÍ VYVÍJEČE DUSÍKU	43
8.4.1 GENERÁTOR LASERGAS 9-300	44
8.4.2 VÝPOČET CENY DUSÍKU Z VYVÍJEČE	45
8.5 KONEČNÉ CENY DUSÍKU PODLE FORMY DODÁNÍ	45
9 SNÍŽENÍ SPOTŘEBY DUSÍKU NASTAVENÍM ŘEZNÝCH PODMÍNEK	46
9.1 PARAMETR Č. 1 – NASTAVENÍ OHNISKOVÉ ROVINY	49
9.1.1 PŮVODNÍ NASTAVENÍ OHNISKOVÉ ROVINY	50
9.1.2 POKUS Č. 1 – NOVÉ NASTAVENÍ OHNISKOVÉ ROVINY	51
9.1.3 HODNOCENÍ POKUSU Č. 1	52
9.2 PARAMETR Č. 2 - NASTAVENÍ TLAKU PLYNU	53
9.2.1 VÝPOČET SPOTŘEBY DUSÍKU	53
9.2.2 PŮVODNÍ NASTAVENÍ TLAKU	57
9.2.3 POKUS Č. 2 – NOVÉ NASTAVENÍ TLAKU	57

9.2.4 HODNOCENÍ POKUSU Č. 2	58
9.3 PARAMETR Č. 3 – NASTAVENÍ PRŮMĚRU TRYSKY	59
9.3.1 PŮVODNÍ NASTAVENÍ PRŮMĚRU TRYSKY	59
9.3.2 TVAR GEOMETRIE TRYSKY	60
9.3.3 POKUS Č. 3 - ŘEZÁNÍ S MENŠÍM PRŮMĚREM TRYSKY	61
9.3.4 HODNOCENÍ POKUSU Č. 3	63
9.4 PARAMETR Č. 4 - NASTAVENÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI	64
9.4.1 PŮVODNÍ NASTAVENÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI	64
9.4.2 POKUS Č. 4 - ŘEZÁNÍ S VYŠŠÍ ŘEZNOU RYCHLOSTÍ	65
9.4.3 HODNOCENÍ POKUSU Č. 4	65
9.5 PARAMETR Č. 5 - NASTAVENÍ VÝKONU LASERU	66
9.5.1 PŮVODNÍ NASTAVENÍ VÝKONU	66
9.5.2 POKUS Č. 5 : VLIV SNÍŽENÍ VÝKONU	67
9.5.3 HODNOCENÍ POKUSU Č. 5	67
9.6 PARAMETR Č. 6: NASTAVENÍ VZDÁLENOSTI TRYSKY OD PLECHU	68
9.6.1 PŮVODNÍ NASTAVENÍ TRYSKY	69
9.6.2 POKUS Č. 6: VLIV VZDÁLENOSTI TRYSKY OD PLECHU NA KVALITU ŘEZU	69
9.6.3 HODNOCENÍ POKUSU Č. 6	69
 10. ZÁVĚR	 70
 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	 72
SEZNAM PŘÍLOH	76

Seznam zkratek

A	absorpce materiálu	[%]
AISI 304	obchodní označení korozivzdorné oceli	[-]
Ar	chemická značka argonu	[-]
b	skluzová rýha	[-]
BPP	popisuje fokusovatelnost světelného svazku	[mm.mrad]
bar	vedlejší jednotka tlaku v soustavě SI 1 bar = 0,1 Mpa	[Pa]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
cw	kontinuálním režim	[-]
ČSN	česká technická norma	[-]
DIN	německá národní norma	[-]
E0; E1; E4	energetické hladiny atomu	[J]
GaAs	Galium arsenid	[-]
Ge	Germanium	[-]
H, HK	označení různých tvarů trysek tvary	[-]
He	chemická značka helia	[-]
ISO	mezinárodní norma	[-]
K	index posuzuje, na jak velkou plochu lze paprsek z fokusovat	[-]
K	označení tvaru trysky	[-]
L	délka světelného paprsku	[m]
M	Molární hmotnost	[kg.mol ⁻¹]
M ²	určuje, na jak malou plochu je možné fokusovat svazek	[W/m ² /Sr]
mrad/m	jednotka divergence paprsku	[m]
n	Skluz n	[mm]
N ₂	chemická značka dusíku	[-]
Nd:YAG	typ pevnolátkového laseru	[-]
NK	označení tvaru trysky	[-]
nm	nanometr 0,000001 mm	[mm]
Nm ³	Normální krychlový metr, při teplotě 0 °C a běžném tlaku	[Nm ³]
O ₂	chemická značka kyslíku	[-]
P _{abs}	absolutní tlak p1+p2	[Pa]
P 1	jiný tlak než běžný	[Pa]
P 2	atmosférický tlak - smluvní hodnota	[Pa]
PSA	typ generátoru dusíku	[-]

pw	pulzní režim	[-]
Qh	hmotnostní průtok	[kg.s ⁻¹]
Qo	objemový průtok	[m ³ /h]
r	nastavení horní hrany;	[-]
R	Reflektivita	[%]
R	univerzální plynová konstanta	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
Ra	drsnost povrchu materiálu	[μm]
Rp	nejnižší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Rv	výška nejvyššího výstupku profilu	[μm]
Rz	největší výška profilu	[μm]
Rz5	průměr největších výšek a hloubek profilů na pěti úsecích	[μm]
S	průřezu trysky:	[m ²]
SLAB	typ CO ₂ laseru	[-]
Sm ³	Standardní krychlový metr, při teplotě 15 °C a běžném tlaku	[Sm ³].
T	teplota	[K]
TEM	transverzální elektromagnetický mód	[-]
TEM mn	transverzální elektromagnet. mód v kartézských souřadnicích	[-]
TEM pl	transverzální elektromagnet. mód ve válcových souřadnicích	[-]
TEM 00	označení paprsku ve tvaru Gaussovy křivky	[-]
TEM 01	označení prstencového módu	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
u	úchylka kolmosti	[mm]
Vp	Rychlost proudícího plynu	[m.s ⁻¹]
Δ a	prostor, kde posuzovaná úchylka kolmosti není měřena	[mm]
ε	součinitel zúžení trysky	[-]
ζ	ztrátový součinitel trysky	[-]
κ	Izoentropický exponent dvouatomových plynů 1,4	[-]
λ	vlnová délka	[nm]
Λ	součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ	výtokový součinitel pro kuželovou trysku	[-]
μm	mikrometr 0,001 mm	[mm]
ρ 2	hustota dusíku při běžném tlaku a teplotě 20 °C	[kg . m ⁻³]
ρ 1	hustota plynu při jiném tlaku než běžném	[kg . m ⁻³]
φ	rychlostní součinitel trysky	[-]
ψ	výtoková funkce pro nadkritické proudění	[-]

I řekl Bůh: „Buď světlo!“ A bylo světlo.

Viděl, že světlo je dobré...

[Genesis, kapitola 1, verš 3,4]

1 Úvod

Rychlost!!!! Rychlost je slovo, které definuje dnešní dobu. Nejedná se jen o rychlost výroby, ale i rychlost vývoje nových technologií. Co však lze označit pojmem „nová technologie“? Laser používáme již 55 let, ale většina z nás má o něm jen mlhavou představu. Obklopuje nás mnoho dalších vynálezů, takže ty „55 let staré“ bereme jako samozřejmost, aniž bychom znali jejich podstatu.

Protikladem k tomu jsou konvenční způsoby obrábění, jako je soustružení, frézování, vrtání a broušení, které se vyvíjeli po několik stovek let. Primitivní soustruh je zaznamenán již na výkresu Leonarda da Vinci. Dlouhý vývoj umožnil nabyté zkušenosti v dostatečné míře odzkoušet a předat další generaci, která je opět předala dál. Lze říci, že například vrtání již patří do genové výbavy lidstva. I malé dítě zná vrták a ví, na co se používá.

Nekonvenční způsoby obrábění, jako je řezání laserem, vodním paprskem, obrábění ultrazvukem, atd. procházejí velmi rychlým vývojem. Rychlost inovací způsobuje, že v mnoha firmách je například CO₂ laser vyřazován již jako zastaralá technologie a je nahrazován vláknovými lasery, v jiných firmách se s CO₂ laserem teprve seznamují.

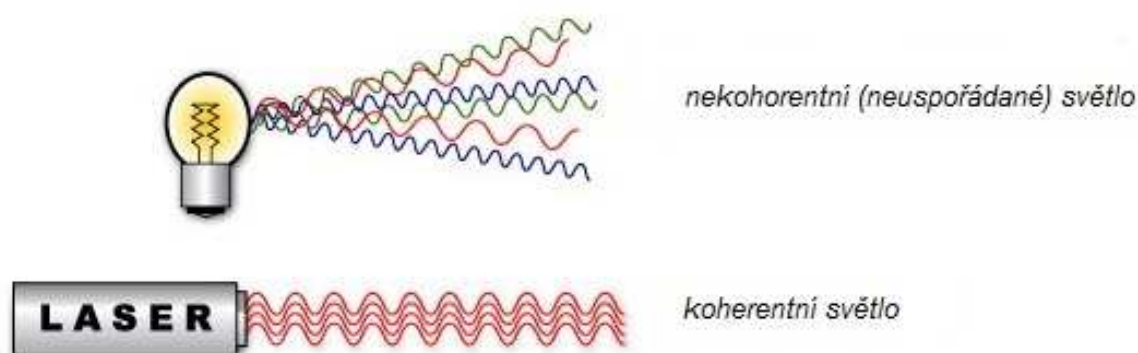
Výhodou novějších způsobů obrábění je výrazně vyšší produktivita. Nevýhodou však je, že s těmito technologiemi umí pracovat relativně málo lidí. A když se to už někdo naučí, své zkušenosti nepředává, protože tak zvyšuje svoji cenu na trhu práce. Důsledkem toho je, že firmy hledají své vlastní postupy, které však mezi sebou nesdílejí, ale naopak je tají.

Tímto procesem prochází i firma, která zakoupila starší, repasovaný laser za účelem řezání korozivzdorných plechů. Po jednodenním školení má operátor společně s programátorem kostrbatě přeložený návod, který kromě obrázku tlačítka ON - OFF příliš neprozrazuje. Důsledek toho je, že stroj spotřebuje měsíčně dusík za 150 tisíc Kč. Tento problém řešilo mnoho firem, každá odlišným způsobem. Firma Cimbria HMD s.r.o. tento problém vypsala jako téma, kterým se zabývá tato diplomová práce.

2. Podstata laseru

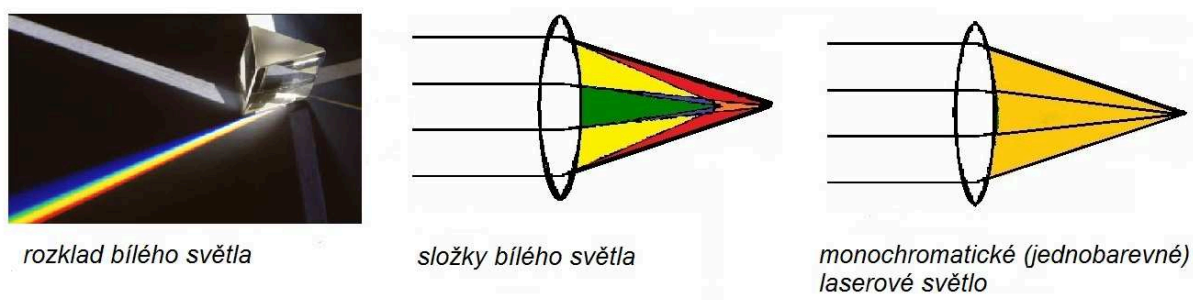
Slovo LASER je zkratka složená z počátečních písmen anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená „zesílení světla pomocí vynucené emise záření“. Laser je zařízení, které přeměňuje dodávanou energii na laserové světlo. Tento přístroj potvrzuje zákony kvantové fyziky a mechaniky. Objev laseru potvrdil předchozí fotonovou hypotézu. Světlo lze za určitých podmínek vnímat jako elektromagnetické vlnění a za jiných podmínek jako proud částic- fotonů. Tento jev se nazývá dualismus světla.

Paprsek je z přístroje vyzařován ve formě úzkého svazku, který se však od běžného světla vytvářeného například žárovkou liší tím, že je koherentní, to znamená uspořádané, monochromatické, to znamená jednobarevné, a má malou divergenci, tedy rozbíhavost. [1,3,4]



Obrázek 1: Vlastnosti běžného a laserového světla [61]

Při rozložení bílého světla optickým hranolem na jednotlivé složky má každá barva své vlastní ohnisko, a proto i jinou vlnovou délku. Monochromatické, tedy jednobarevné světlo má pouze jednu vlnovou délku. Z tohoto důvodu je možné paprsek světla soustředit do jednoho bodu. [2]



Obrázek 2: Rozdíl mezi bílým a laserovým monochromatickým světlem [2][25]

2.1 Historie laseru

Laserový paprsek vzniká na principu indukované emise, kterou již v roce 1917 předpověděl ve své teorii Albert Einstein. V roce 1958 Charles Hard Townes se svým týmem provedl výpočty, které umožnily Einsteinovy myšlenky realizovat. V roce 1960 americký fyzik Theodor Maiman nanесl na stěny krystalu umělého rubínu tenkou vrstvu stříbra, které mělo funkci zrcadla. Po ozáření krystalu zeleným světlem pronikl jedním zrcadlem červený paprsek laserového světla. Vznikl tak první, velmi nedokonalý laser.

V roce 1964 Kumar Patel sestrojil plynový CO_2 laser s kontinuálním provozem. Průmyslové využití laserů začalo v roce 1965, kdy se touto technologií poprvé zhotovily otvory do diamantových raznic. O dva roky později byl laser využit v kombinaci s kyslíkem jako asistenčním plynem pro řezání ocelových plechů. Následně se laser začal používat i pro dělení nekovových materiálů. Od té doby se lasery stále vyvíjí a pronikají do každodenních činností člověka. [3, 5]

2.2 Princip vzniku laseru na úrovni atomu

Princip, na kterém pracuje laser, výstižně popisuje planetární model atomu. Každý atom má kladně nabitě jádro, kolem kterého po uzavřených drahách obíhají záporně nabitě elektrony. V každé dráze má tedy elektron určitou energii. Čím vzdálenější je dráha od jádra, tím je energie větší. Při běžných podmínkách jsou elektrony v základním stavu, kdy obíhají po dráze s nejmenším poloměrem.

Jestliže na atom dopadne záření, tak obíhající elektron musí přijmout dodanou energii a vystoupá na vyšší oběžnou dráhu. Tím, že se elektron posunul na vyšší energetickou hladinu, však došlo k nerovnováze sil v atomu. Každé prostředí se vždy snaží být ve stavu rovnováhy, a proto elektron samovolně přejde opět na nižší energetickou hladinu. Vzniklý přebytek energie je vyzářen do prostoru ve formě monochromatického koherentního světla. [3, 5]



Obrázek 3: Planetární model atomu[5]

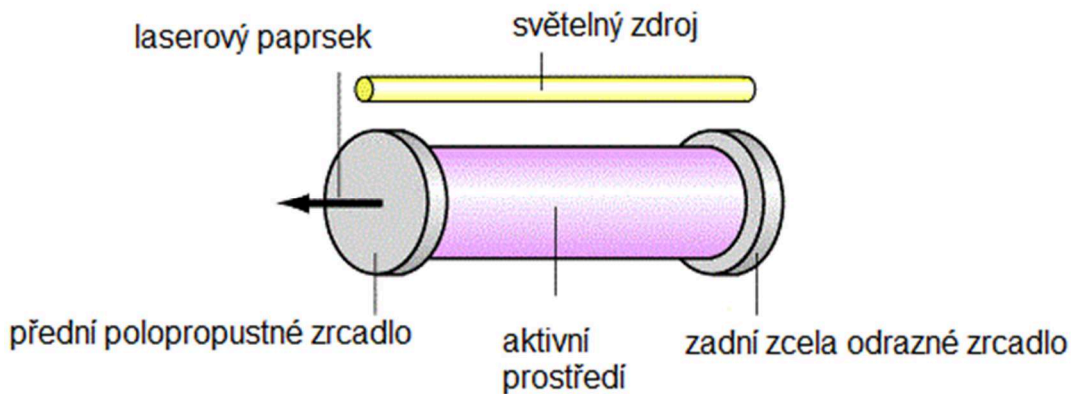
2.2.1 Podmínky nutné ke vzniku laserového záření

Laserový paprsek může vznikat v pevném, kapalném i plynném prostředí. Protože se tato diplomová práce zabývá řešením problémů CO_2 laseru, je vznik paprsku popsán v plynném aktivním prostředí.

Laserový svazek vzniká a zesiluje v optickém rezonátoru. Je to dutý prostor, ve kterém je aktivní prostředí - plyn. Tento prostor je ohraničen zrcadly. Jedno zrcadlo je zcela odrazivé, druhé je částečně propustné.

Zcela odrazivé zrcadlo bývá obvykle dielektrické. To je tvořeno vrstvami izolačních materiálů, které odrážejí jen určité spektrum elektromagnetického vlnění. CO_2 lasery používají zrcadla, která mají na povrchu vrstvu oxidu zirkonu, oxidu křemíku nebo oxidu titanu. U některých typů je dielektrické zrcadlo nahrazeno leštěným kovem, například mědí nebo stříbrem.

Polopropustné zrcadlo je pokryto vrstvou kovu o tloušťce jen několika atomů. Toto zrcadlo odráží světlo do určité intenzity záření. Po překročení únosné meze světlo projde zrcadlem ve formě laserového paprsku. Zrcadla v rezonátoru mohou být rovinná, ale i konkávní nebo konvexní. Zakřivení a průměr zrcadel ovlivňuje rozbíhavost paprsku a tzv. mód. [2, 11, 28]

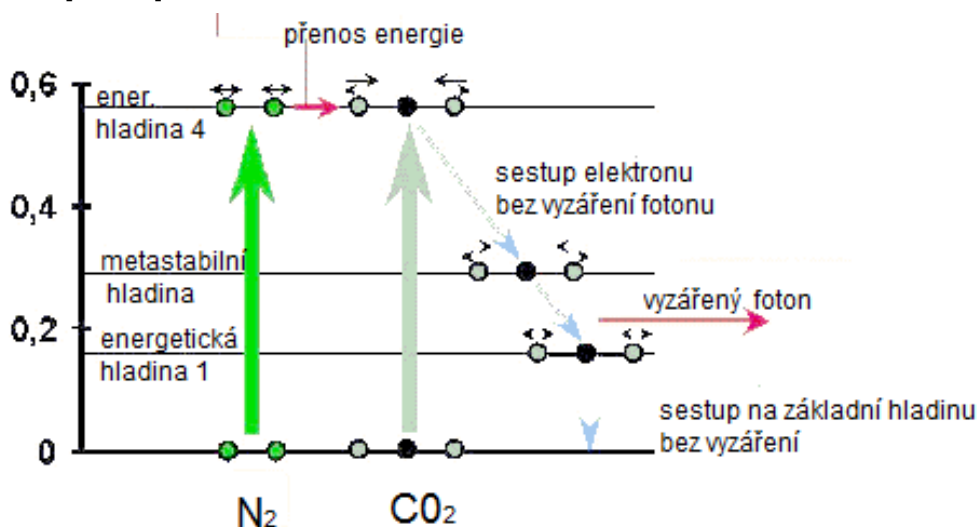


Obrázek 4: Schéma rezonátoru

Dalšími podmínky se týkají aktivního prostředí. Je nutné, aby se elektrony pohybovaly po dvou nebo více oddělených energetických hladinách, a aby jedna z hladin byla metastabilní. Zjednodušeně si lze představit, že metastabilní hladina leží mezi nejvyšší energetickou hladinou a mezi nejnižší. Při samovolném sestupu z vyšší hladiny (např. E_4) elektrony na „sebe čekají“ na metastabilní hladině, a při určitém počtu společně sestupují do základního stavu (E_1) a vyzařují fotony. Aktivní prostředí musí být opticky i chemicky stabilní. Přístroj musí mít vhodný vnější zdroj energie, kterým lze „vybudit“ aktivní plynné prostředí. [2, 6, 28]

2.2.2 Fáze vzniku laserového paprsku

- Základní stav:** Atomy plynu jsou v rezonátoru. Nejnižší energetický stav
- Excitace:** Záblesk světla z vnějšího zdroje vybudí elektrony obíhající kolem jádra na vyšší energetickou úroveň E 4.
- Inverze populace:** Z energetické hladiny E 4 elektron samovolně bez vyzáření fotonu sestoupí na metastabilní hladinu. Počet elektronů na metastabilní hladině převažuje nad počtem elektronů na nižší hladině (E 1).
- Spontánní emise:** Dochází k samovolnému (nežádoucímu) návratu některého elektronu z metastabilní hladiny na nižší energetickou hladinu. Přbytek energie se nekontrolovatelně uvolní formou světla nebo tepla, které však opětovně „vybudí“ fotony „ležící“ na základní hladině.
- Stimulovaná emise:** Všechny elektrony „čekající“ na metastabilní hladině jsou stimulujícím fotonem „shozeny“ z metastabilní hladiny do základního stavu. Při tomto přestupu elektrony současně vypustí foton. Tyto fotony se spojí ve světelný paprsek.
- Laserový paprsek:** Protože celý děj se odehrává v rezonátoru, tak vzniklý paprsek se začne pohybovat od jednoho zrcadla k druhému a počet fotonů se exponenciálně zvyšuje. Intenzita světla uvnitř rezonátoru postupně narůstá, dochází ke stimulovanému zesílení světla. Tato energie se uvolní ve formě laserového paprsku, který polopropustným zrcadlem vychází z rezonátoru. Celý děj se odehrává v několika milisekundách. [2, 4, 5]



Obrázek 5: Stimulovaná emise [9]

2.3 Charakteristika laserového paprsku

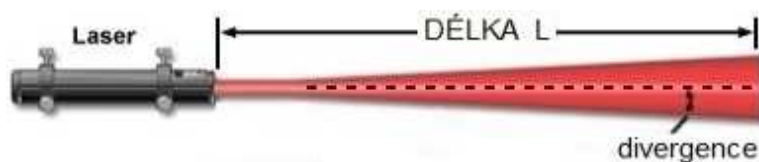
Laserový paprsek je definován svojí vlnovou délkou, divergencí, průměrem, výkonem, polarizací a rozdělením hustoty energie v příčném průřezu, tzv. módem.

2.3.1 Vlnová délka

Základní parametr laserového záření je vlnová délka. Většinou se udává v nanometrech ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). U CO_2 laseru se vlnová délka značí v mikrometrech ($1 \text{ }\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$). Vlnová délka paprsku se rovná vzdálenosti energetických hladin v atomu aktivního prostředí. [1, 2]

2.3.2 Divergence

Rozbíhavost světelného svazku neboli divergence popisuje změnu kruhové stopy paprsku se změnou vzdálenosti L . Udává se ve stupních nebo radiánech. Pokud je divergence 1 mrad/m, tak se laserový paprsek na každém metru své délky rozšíří o 1 mm. Snahou je dosáhnout co nejmenší divergence, aby vlastnosti paprsku byly konstantní. K minimalizaci divergence se používá optický teleskop, který je umístěn v optické trase stroje. Teleskop, rozšiřuje paprsek na 1,5 - 2 násobek původního rozměru a současně snižuje divergenci pod hranici 1 mrad. [11, 26]



Obrázek 6: Rozbíhavost paprsku [30]

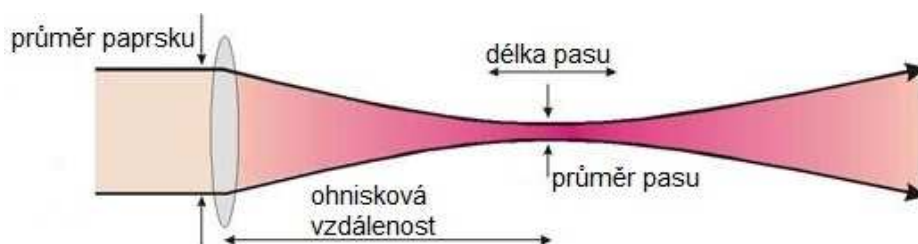
2.3.3 Průměr paprsku

Z rezonátoru vychází paprsek, který má průměr řádově několik milimetrů. Takový svazek nemá dostatečnou hustotu energie. Z důvodu malé divergence lze takový paprsek optickou soustavou zaostřit na velmi malý průměr. Zaostření paprsku se nazývá fokusace. Díky tomu má paprsek vysokou hustotu energie a tím schopnost tepelně ovlivňovat materiál - ohřívat, tavit a odpařovat. [2][8]



Obrázek 7: Fokusace paprsku [27]

Fokuseovaný paprsek vytváří takzvaný pas, ve kterém je největší koncentrace energie. Za tímto místem se světelný svazek opět rozšiřuje a ztrácí svoji energii. Každá ohnisková vzdálenost tvoří předem definovaný průměr pasu a délku pasu. [2, 8]



Obrázek 8: Pas fokusovaného paprsku [24]

U CO₂ laseru se používají dva druhy čoček, obě mají průměr 38,1 mm. Při použití fokusační čočky s menší ohniskovou vzdáleností 5" (127 mm) má paprsek průměr 0,13 mm a délka ohniska je 0,6 mm. Průměr paprsku se směrem od ohniska rychleji zvětšuje, což negativně ovlivňuje kolmost řezu, a proto se používá pro dělení slabších materiálů.

Při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 7,5" (190,5 mm) dosahuje paprsek průměru 0,19 mm a délka ohniska je 1,4 mm. Je to větší aktivní oblast, která tvoří širší řeznou drážku, ze které se snadněji vyfukuje roztavený kov. Používá se pro řezání silnějších materiálů.

Obecně platí, že čím je svazek užší, tím větší je jeho energetický výkon, ale i větší rozbíhavost pod ohniskem.[2, 8, 12]



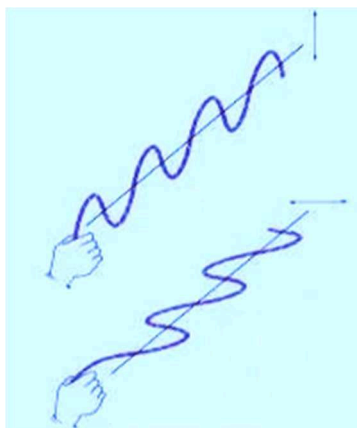
Obrázek 9: Geometrie paprsku v závislosti na ohniskové vzdálenosti čočky [23]

2.3.4 Výkon paprsku

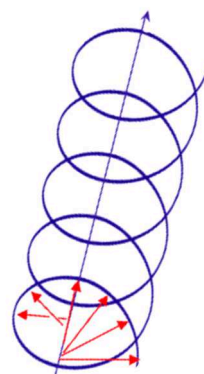
Výkon paprsku se udává ve wattech (W). Z této hodnoty je odvozena v praxi nejvíce sledovaná hodnota - **výkonová hustota paprsku**. Je to výkon působící na jednotku plochy. Udává se ve W/mm^2 . Pokud se jedná o pulsní laser, tak na jeho výkon má vliv i frekvence vyzařovaných pulsů, která se udává v Hz (počet pulsů vyzařených za sekundu). [13]

2.3.5 Polarizace paprsku

Polarizace paprsku je důkazem o dualitě světla. Dosud zde bylo světlo popisováno jako pohybující se částice - fotony. Energie přenášená paprskem se však chová stejně jako energie, kterou přenáší kmitající lano, to znamená, že světlo má i charakter elektromagnetického vlnění. Lanem lze kmitat horizontálně, vertikálně nebo je možné s ním točit. Kmity (= energie) se vždy přenesou z jednoho konce na druhý.



Obrázek 10: Vertikální a horizontální vlnění [21]



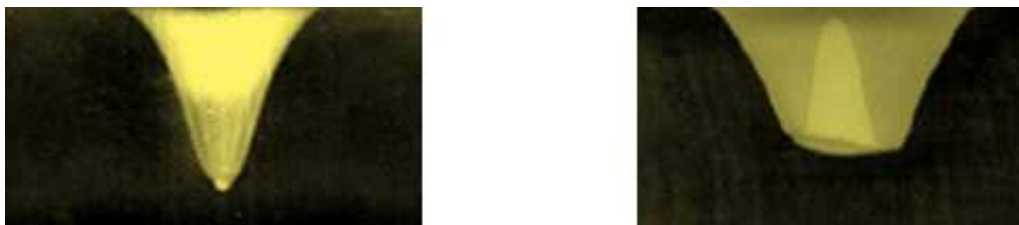
Obrázek 11: Kruhová polarizace [22]

Každé světlo má elektrické a magnetické pole, která jsou kolmá ke směru šíření. Elektrické vektory všech paprsků v laserovém svazku kmitají stejně. Toto kmitání může mít lineární, eliptickou nebo kruhovou polarizaci. Paprsek je polarizován zbroušeným Brewsterovým sklem, kterým prochází svazek po opuštění rezonátoru.

Polarizace ovlivňuje kolmost a kvalitu řezné hrany. Svazkem s lineární polarizací lze řezat velmi vysokou řeznou rychlostí ve směru stejném jako je směr lineárně polarizovaného paprsku. V místě, kde dojde ke změně směru řezu (kolmo na směr vlnění), se začnou tvořit otřepty a zhorší se kvalita povrchu. Proto se používá polarizace kruhová, s kterou lze řezat pomaleji, ale při změně směru řezání ke zhoršení kvality nedochází. Nevhodně polarizovaný paprsek lze poznat při vyříznutí čtverce. Dvě protilehlé hrany jsou kolmé, zbývající dvě hrany jsou podřezány, směrem k dolní straně plechu se rozšiřují. [12, 14, 15]

2.3.6 Rozdělení hustoty energie v příčném průřezu

Velmi zjednodušeně lze rozložení hustoty energie popsat jako tvar paprsku. Je ale nutné paprsek opět vnímat jako proud fotonů, které jsou ve světelném svazku umístěny s různou hustotou. Toto rozmístění popisuje mód paprsku, označován jako TEM (Transverse Electromagnetic Mode). Důkaz o módové struktuře lze získat při nastřelení paprsku do plexiskla, kdy svazek utvoří charakteristickou stopu. [8]

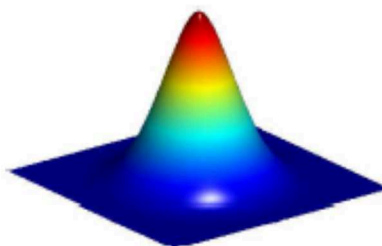


Obrázek 12: Základní mód TEM 00 a prstencový mód TEM 01 [20]

Módová struktura

Módová struktura paprsku je ovlivňována geometrickou konstrukcí rezonátoru. Jedná se o vzdálenost, průměr a zakřivení zrcadel. Elektromagnetické záření se v rezonátoru šíří podél jeho osy (podélné záření) nebo pod určitým úhlem (příčný mód oscilace). Tyto hodnoty určují frekvenci elektromagnetického pole v rezonátoru. Ve strojírenské praxi se módová struktura udává v kartézských souřadnicích (TEM mn), kde indexy m , n určují počet dosažených minim v průřezu paprsku ve vertikálním a horizontálním směru. Příčný mód může být definovaný i ve válcových souřadnicích (TEM pl). Indexy p , l označují počet minim v radiálním a úhlovém rozložení. [2, 8]

Ideální, nejméně ztrátové vyzařování energie je ve tvaru Gaussovy křivky označováno TEM 00 (transversal electromagnetic mode of order 00). Paprsek s tímto módem je rotačně symetrický podle svislé osy, má minimální rozbíhavost a je možné jej maximálně zaostřit. Největší intenzita paprsku je uprostřed a k okrajům postupně klesá. Paprsek ve tvaru Gaussovy křivky nemá žádné minimum, a proto je označován 00. [8,16]

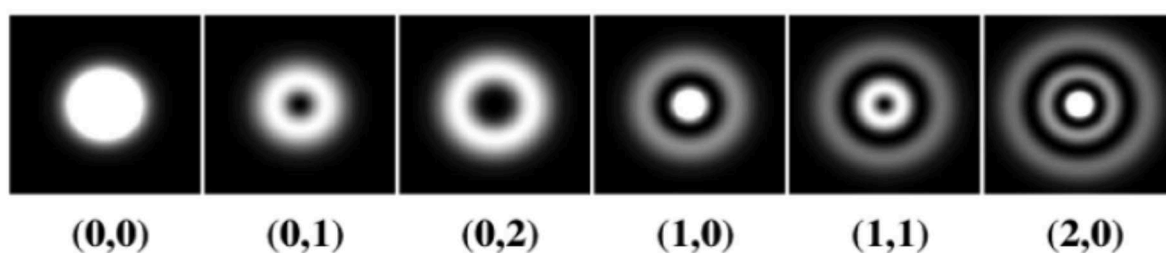


Obrázek 13: Tvar Gaussovy křivky s barevně vyznačenou energetickou intenzitou [17]

Úpravou parametrů v rezonátoru lze mód paprsku měnit. Na obrázku je několik módů, které lze získat modifikací základního módu vycházejícího z Gaussovy křivky. Svítivě bílá barva znázorňuje nejhustší, tedy energeticky nejvýkonnější část světelného svazku. Při řezání na CO₂ laseru se používají pouze dva módy.

TEM 00 je vhodný pro řezání plechů o menších tloušťkách. Tvoří symetrický řez a úzkou řeznou spáru. Centrum intenzity leží uprostřed.

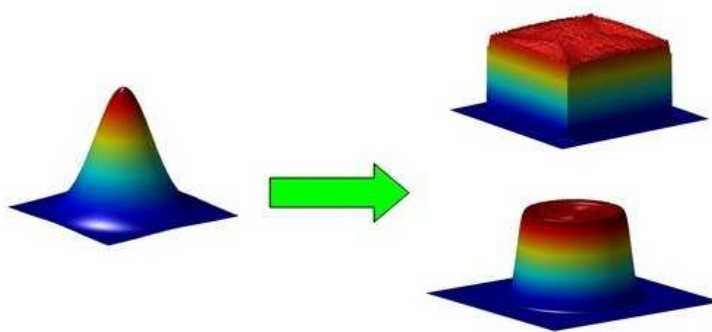
TEM 01 se nazývá prstencový mód. Intenzita na ose paprsku je nulová, největší energie se rozkládá v prstencovité oblasti kolem osy. TEM 01 je vhodný pro stroje s výkonem větším než 3 kW. [8, 19]



Obrázek 14: Módy vzniklé modifikací Gaussova svazku [19]

Moderní optické přístroje dokážou paprsek ve tvaru Gaussovy křivky upravit na top hat profil. Příčný průřez intenzity záření má tvar obdélníku. Mód je rotačně symetrický podle svislé osy, ale nemá vrchol intenzity. K jeho vzniku vedl požadavek, aby paprsek měl jasně definovanou ostrou hranici, a bylo tak zřejmé, kde paprsek působí a kde je nezasažená oblast.

Ve strojírenství se tento mód používá pro řezání materiálů, kde je nutné dodržet minimální tepelně ovlivněnou zónu, nebo pro řezání silných plechů, protože top hat profil tvoří širší řeznou drážku. Používá se i pro přesné povrchové kalení. [18]



Obrázek 15: Gaussův a top hat profil [18]

2.4 Kvalita svazku

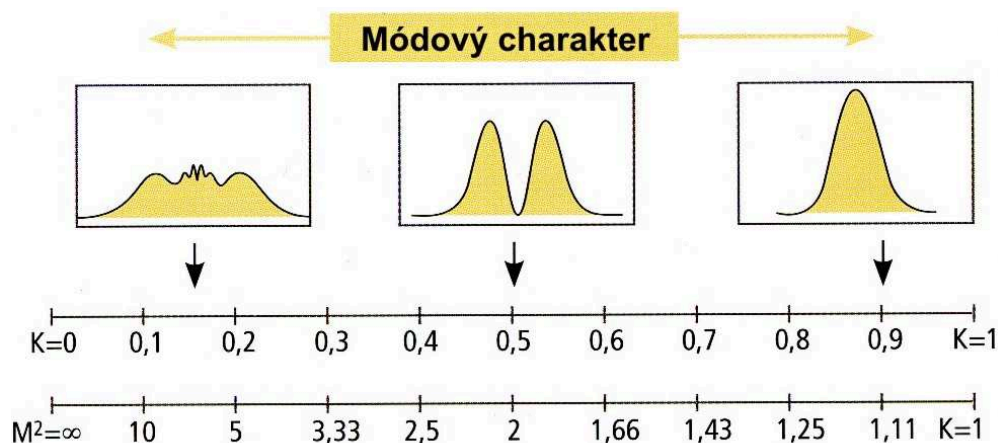
Základní kvalitativní charakteristikou svazku je hodnota BPP (Beam Parameter Product), která popisuje fokusovatelnost světelného svazku. Parametry pro jeho výpočet jsou: poloměr paprsku v pasu, divergence a Rayleighova vzdálenost, což je délka, ve které je plocha svazku dvakrát větší než v místě krčku. Čím větší je BPP, tím obtížnější je jeho fokusace, a tedy i nižší kvalita. Hodnota BPP je zásadní z pohledu optiky (používá se při konstrukci rezonátoru), ale ve strojírenské praxi se nepoužívá. Jednotkou BPP je mm.mrad. [1, 16, 31]

Pro jednodušší porovnání kvality světelného svazku se používá faktor šíření M^2 (factor beam quality), který určuje, na jak malou plochu je možné příslušnou optikou fokusovat svazek. Současně s výkonem určuje zářivost (jas) svazku [$\text{W}/\text{m}^2/\text{Sr}$].

Pro Gaussův svazek: $M^2 = 1$, pro všechny ostatní $M^2 > 1$.

Alternativou k faktoru M^2 je v praxi používaný faktor kvality svazku K . Jedná se o převrácenou hodnotu M^2 . V tomto případě se nezjišťuje, na jak malou plochu lze zaostřit paprsek, ale naopak na jak velkou plochu lze paprsek fokusovat. $K = 1 / M^2$ [1, 16, 31]

Pro Gaussův svazek: $K = 1$, pro všechny ostatní $K < 1$.



Obrázek 16: Porovnání kvalitativních indexů [40]

3 Rozdělení laserů

Lasery lze rozlišovat podle mnoha aspektů. Následné rozdělení je provedeno z pohledu: aktivního prostředí, typu buzení, vlnové délky, délky impulsu a podle typu kvantových přechodů.

3.1 Rozdělení podle aktivního prostředí

3.1.1 Plynové lasery

Aktivní prostředí je tvořeno molekulami, atomy nebo ionty některého plynu. Tyto lasery pracují v pulzním nebo kontinuálním režimu v širokém rozsahu vlnových délek. Excitace probíhá s využitím elektrického výboje. Plynové lasery mají výborné parametry díky homogennímu aktivnímu prostředí. S výjimkou CO₂ laseru mají plynové lasery relativně malý výkon, ale vysokou kvalitu svazku. Nejrozšířenější je v průmyslu používaný infračervený CO₂ laser pro řezání a svařování kovů. V medicíně se používá červeně zářící helium – neonový laser. Zelené a modré efekty argonového laseru lze spatřit při laserové světelné show. Do skupiny plynových laserů patří i excimerový laser, který produkuje ultrafialové záření díky spojením dvou atomů různých vzácných plynů (argon - krypton, krypton – fluor.) [2, 4, 8, 26]

3.1.2 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím jsou roztoky různých organických barviv. Díky několika druhům barviv a metod je možné dosáhnout všech vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Proto se kapalinové lasery používají ve spektroskopii k bezkontaktní nedestruktivní analýze látek. Nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí, které se rozkládá působením tepla a světla. [1, 2, 8, 39]

3.1.3 Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím jsou amorfni nebo krystalické izolanty s příměsí iontů, excitace bývá optická. Záření mají v oboru infračerveného a viditelného světla. Jedná se např. o rubínový laser, jehož aktivním prostředím je krystal syntetického rubínu (první laser - 1963). Nejrozšířenější je Nd:YAG laser. Aktivním materiálem je krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu, vyzařující infračervené záření, který má uplatnění v medicíně. Ve strojírenství se v současné době prosazuje technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru – vláknový (fiber) laser. Aktivní prostředí i rezonátor současně tvoří dlouhé optické vlákno, které je dopované prvky vzácných zemin erbiumem nebo yterbiem. Buzení se provádí laserovou diodou. Místo zrcadel jsou na povrchu optického vlákna „struktury“, tzv. Bragovské

mřížky. Paprsek vychází z vlákna pomocí optického kolimátoru. Vláknové lasery mají vysokou účinnost a nízký příkon. Chlazení se provádí pouze vzduchem. [2, 5, 39]

3.1.4 Polovodičové lasery

V současné době nejrozšířenější skupina laserů používaných ve spotřební a výpočetní elektronice (čtečky kódů, CD a Blu-ray přehrávače, laserové tiskárny, laserová ukazovátka). Zdrojem záření je laserová dioda, jejíž účinnost je vysoká (až 50 %), a její výkon se dá měnit změnou elektrického proudu. Výhodou je nízká cena, která vedla k masovému rozšíření laseru do spotřební elektroniky. Nevýhodou je, že paprsek polovodičových laserů je rozbíhavější, tedy méně kvalitní než u jiných typů laserů. [1, 2, 4, 8]

3.2 Rozdělení podle typu buzení

3.2.1 Optické buzení

Energie, potřebná pro vznik laserového záření, je dodána světelným zábleskem xenonové výbojky. Používá se v kapalinových a pevnolátkových laserech. Čerpání výbojkami má nízkou účinnost a je nutné intenzivní chlazení. Proto se v současnosti přechází k buzení pomocí polovodičových LED diod nebo polovodičových laserů. [8, 32]

3.2.2 Buzení elektrickým výbojem

Impulzem ke spuštění reakce je elektrický výboj, který je iniciován v plynové náplni laseru ze zdroje cca 1000 voltů. U CO₂ laserů lze provést i dynamický způsob buzení – expanzi. K excitaci molekul dochází díky elektrickému obloukovému výboji o vysoké teplotě. [8, 32]

3.2.3 Buzení elektrickým proudem

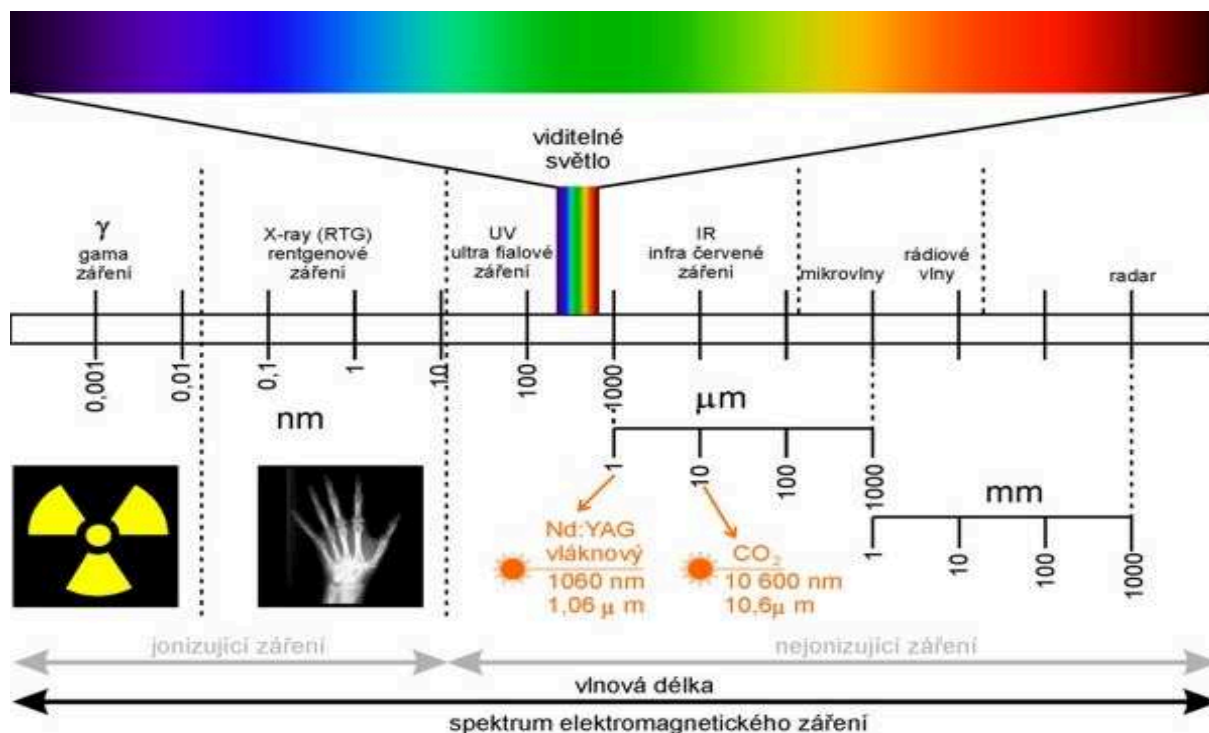
Injekcí nosičů náboje, které se používá pro laserové diody. [8, 32]

3.2.4 Chemická excitace

Pro vznik laserového paprsku se využívá energie chemických exotermických reakcí. První takový laser vznikl v roce 1965. Využil reakce chloru s vodíkem. Později se začala využívat reakce fluoru s vodíkem. U jiného typu laseru lze získat počáteční energii štěpením molekul jódu pomocí ultrafialového záření. Kromě výše popsaných metod lze použít i buzení elektronovým svazkem a rekombinací. [8, 32]

3.3 Rozdělení podle vlnové délky záření

Podle použitého prostředí produkují lasery záření různé vlnové délky, tzn. různé barvy. Rentgenové lasery, ultrafialové lasery, lasery viditelného pásma, infračervené lasery.



Obrázek 17: Vlnové spektrum [5]

3.4 Rozdělení podle délky impulsu paprsku

3.4.1 Kontinuální režim

Buzení aktivního prostředí probíhá bez přerušení. Z rezonátoru vychází souvislý světelný svazek. Kontinuální režim se značí cw (continuous wave).[2, 5, 6]

3.4.2 Pulzní režim

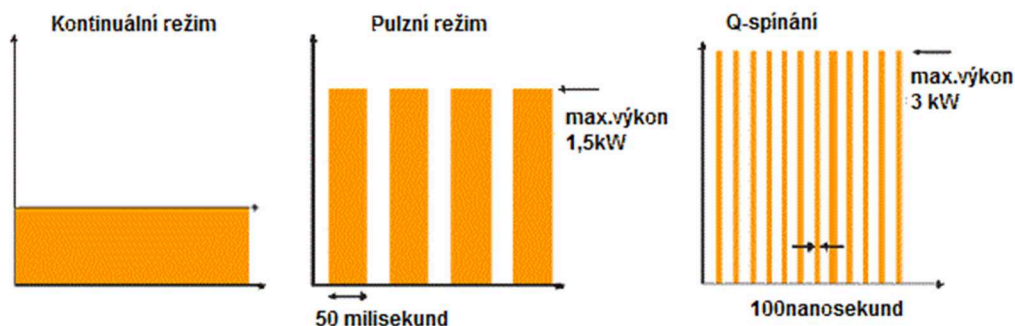
Opakované přerušení budícího výboje v rezonátoru generuje pulzní laserový svazek. Pulsním provozem se dosahuje velké hustoty energie, a proto se používá při řezání nebo vrtání v materiálech s velkou odrazivostí. Při pulzním provozu je řezání pomalejší než při cw režimu, dochází ale k zvýšení kvality řezu. Současně se sníží objemový ohřev materiálu. Další výhodou pulzů je snížení důsledků rázové vlny, tedy zmírnění rozstříku roztaveného kovu při počátečním propalu materiálu. Pulzní režim se značí pw (pulsed wave). [2, 5, 6]

3.4.3 Režim ultrakrátkých pulzů

Pulzy mají délku měřenou v milisekundách (10^{-3} s). Ultrakrátké pulzy mají trvání několik pikosekund (10^{-12} s). Čím kratší je puls, tím větší je výkon paprsku. Ultrakrátké pulzy se používají pro řezání malých otvorů a jemných kontur, například stentů pro operace srdce. Zkracováním délky pulsu k několika nanosekundám se docílilo výkonu srovnatelného s malými elektrárnami. Absorbovaný výkon laseru způsobí v místě dopadu okamžitou sublimaci. Vzniklé teplo se kvůli krátkosti pulzu nestačí šířit ani do nejbližšího okolí místa dopadu. To znamená v podstatě obrábění za studena, bez tepelně ovlivněné oblasti. Tento druh pulzů lze využít při dělení a obrábění tenkých plechů, keramiky a kovových i nekovových fólií. [5, 6, 34]

3.4.4 Q-spínání

Jedná se o kontinuální režim, který omezenou dobu dokáže dodávat výkon jako při pulsním režimu. Během buzení při cw režimu je jedno zrcadlo vyřazeno závěrkou – Q spínačem. Buzení stále pokračuje => inverze roste. Při otevření závěrky všechny elektrony aktivního prostředí vyzáří kumulovanou energii téměř najednou. Jde o krátký impuls (10 – 50 ns) s vysokým výkonem (1 – 100 MW). Podmínkou je dlouhá doba setrvání elektronů na horní energetické hladině. Vlastnosti impulsu závisí na rychlosti závěrky, aktivním prostředí, rychlosti buzení. Tento režim se označuje Q-switch. [2, 5, 33]



Obrázek 18: Pulzní režimy rezonátoru [50]

3.5 Rozdělení podle typu kvantových přechodů

- Molekulární lasery
 - rotační
 - rotačně - vibrační
 - vibrační

Elektronové lasery.

Jaderné lasery [2]

4 CO₂ laser

Z širokého spektra laserů je pro tuto diplomovou práci důležitý plynový CO₂ laser s podélným prouděním plynu. Je to velmi výkonný a konstrukčně relativně jednoduchý a ve strojírenské praxi nejpoužívanější laser.

CO₂ laser byl vynalezen v roce 1964. Zařízení generuje neviditelné infračervené záření s vlnovou délkou 10,6 μm (10 640 nm; 0,0106 mm). Účinnost má 13 % až 20%. Aktivní prostředí tvoří helium (He - obsah 80 %) ve směsi s dusíkem (N₂ - obsah do 10%) a molekuly kysličníku uhličitého (CO₂ - obsah 3 -10 %). [37]

4.1 Princip CO₂ laseru

Stimulovaná emise vzniká pouze v molekulách CO₂. Molekula oxidu uhličitého musí vystoupat až na čtvrtou energetickou hladinu, aby při návratu na první úroveň mohla vygenerovat foton. Při návratu z druhé nebo třetí hladiny nedojde k vyzaření světelné částice. Z tohoto důvodu je ve směsi zastoupený dusík, který přijímá od helia srážkovou energii a tu pak podobným mechanismem nepružných srážek předává molekule oxidu uhličitého. Princip tedy spočívá v přesunu elektronů na vyšší energetickou úroveň pomocí vibrací molekul CO₂. Vlnová délka 10,6 μm, kterou produkuje CO₂ laser je menší, než je rozdíl energetických hladin v obalu atomu. Je to způsobené tím, že excitovaný stav vzniklý rotací a vibrací molekul má nižší energetický potenciál. Helium má výbornou tepelnou vodivost, a proto hlavním účelem tohoto plynu ve směsi je odvod tepla. [17, 37]

Směs plynů se při reakci v rezonátoru zahřívá a tím postupně ztrácí schopnost generovat laserové záření. Z tohoto důvodu se musí plyny kontinuálně obměňovat. Některé stroje mají směšovací stanice a potřebují tak jen lahve s jednotlivými plyny. Pro lasery bez směšovací stanice se směs plynů pracovního prostředí dodává v jedné tlakové lahvi tzv. „premixed gases“. Tyto plyny musí být čisté bez příměsí, protože jakákoliv nečistota má nepříznivý vliv na životnost, přesnost a výkon laseru. Dusík, který se používá jako asistenční plyn při řezání, má jinou úroveň čistoty než dusík, který se používá v rezonátoru. [2, 37]

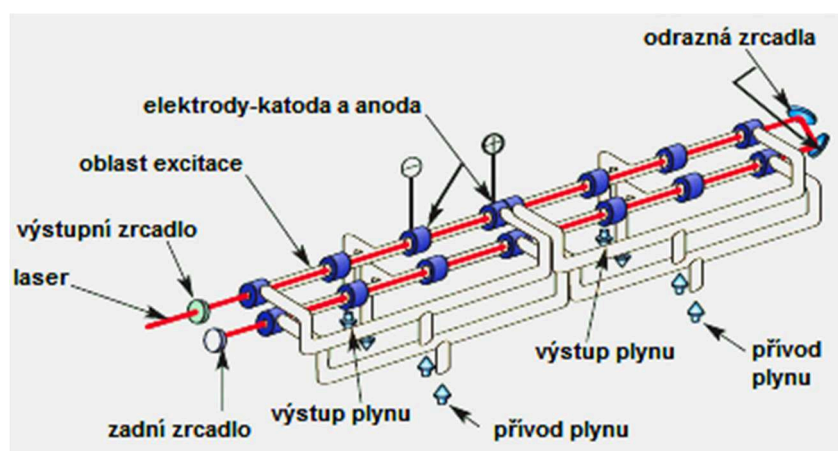
4.2 Rozdělení CO₂ laseru podle čerpání plynu

Konstrukce CO₂ laseru lze rozdělit do třech základních typů podle směru čerpání plynu. Směr pohybu plynu významně ovlivňuje požadovaný výkon a tím i možnost použití laserového přístroje.

4.2.1 Typ s podélným prouděním plynu (fast axial flow)

Výstupní světelný svazek má vyšší kvalitu ($K > 0.4$), a proto se používá pro řezání materiálů. CO₂ lasery s podélným prouděním se stimulují dvěma způsoby. První způsob spočívá v buzení velmi silným elektrickým impulzem pomocí elektrod.

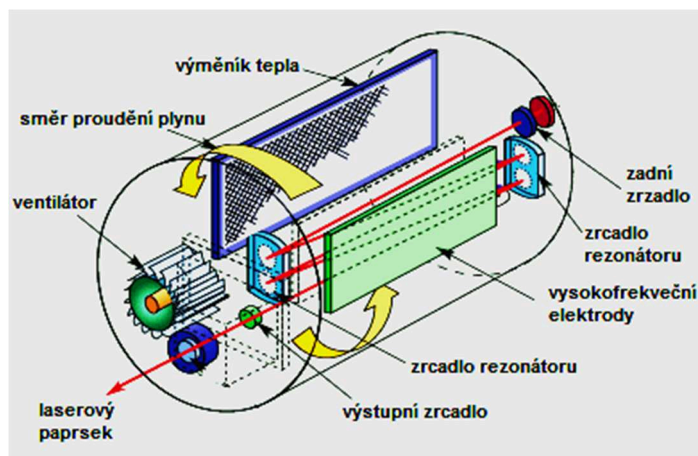
Druhý způsob je buzení elektrickým obloukovým výbojem o vysoké teplotě, který vede k expanzi plynů v expanzní komoře. Excitovaný plyn začne proudit nadzvukovou rychlostí úzkou tryskou do vakua, které je v rezonátoru. Tím, že je v rezonátoru nižší tlak než v expanzní komoře, dojde k samovolnému snížení teploty. Molekuly CO₂ přesto zůstávají po určitou dobu zaplněny elektrony. Jde o tzv. „zamrzání“ vyšších energetických hladin. [17, 37, 38]



Obrázek 19: Laser s podélným prouděním [62]

4.2.2 Typ s příčným prouděním (cross flow)

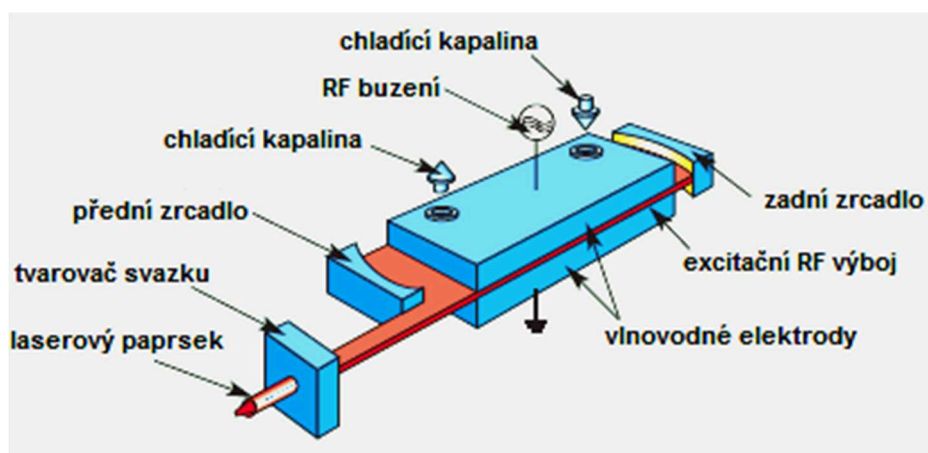
Tento typ laseru vytváří méně kvalitní svazek ($K > 0,18$). Příčinou je nízká rychlost proudění plynů kolmo k ose rezonátoru. Laser je vhodný pro svařování, povlakování a kalení kovů. Výhodou je výrazně menší spotřeba plynů, tedy i levnější provozní náklady. [17, 37, 38]



Obrázek 20: Schéma příčně čerpaného CO₂ laseru [62]

4.2.3 Deskový SLAB laser

Nejnovější typ průmyslových CO₂ laserů. Jedná se o difúzně chlazený laser, který má výhodu, že nepotřebuje vnější zdroj plynové směsi. Přístroj obsahuje zásobník, jehož objem cca 10 l vystačí na 12 měsíců nepřetržitého provozu. Směs v rezonátoru se obnovuje po 72 hodinách provozu. K odvodu tepla u SLAB laseru dochází jeho rozptylem na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách. Generovaný svazek má obdélníkový průřez, který je vodou chlazenou jednotkou transformován na rotačně symetrický svazek s vysokou kvalitou ($K > 0,8$). Díky nové konstrukci, která neobsahuje pohyblivé součásti, jde o spolehlivý systém s nízkou spotřebou plynů i energie.[5, 17]



Obrázek 21: Schéma SLAB laseru [62]

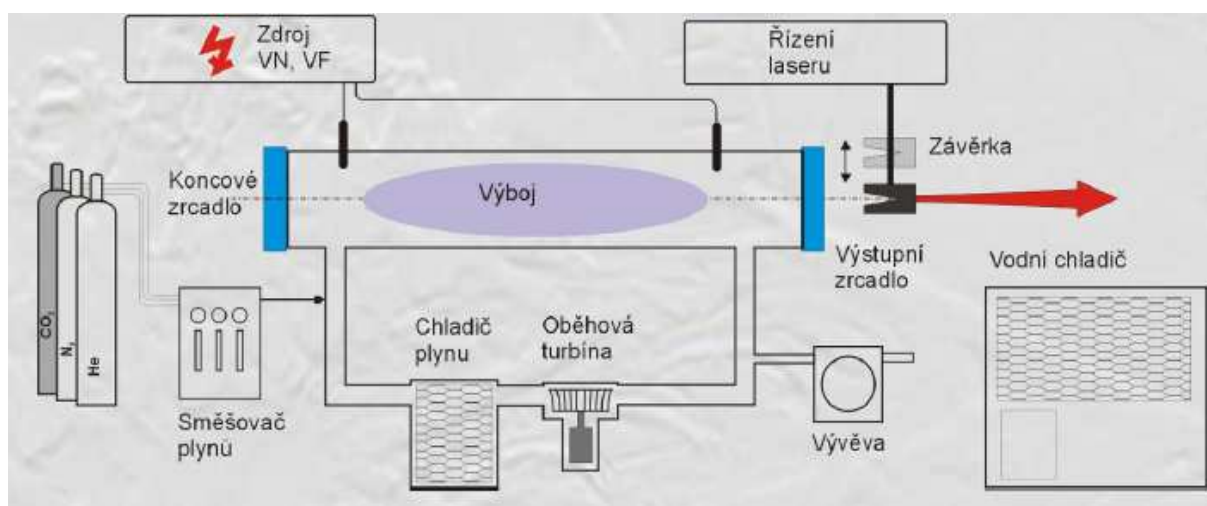
4.3 Konstrukce CO₂ laseru s podélným prouděním, buzení elektrickým impulzem

Základem rezonátoru s podélným prouděním plynu jsou vnější a vnitřní trubice. Vnitřní trubice s aktivním plynem CO₂ má průměr 10 až 20 mm, její délka je 0,5 až 1 m. Většinou bývá zalomená na dvě poloviční délky, které jsou na jednom konci spojené zrcadly pod úhlem 45 stupňů. Sníží se tím celková délka rezonátoru.

Vnitřní trubice je na jednom konci opatřena vakuovou pumpou, která vždy na začátku procesu vysaje všechny částice. Z druhé strany je do dutiny vháněna směs plynů. Po naplnění je plyn vybuzen vysokým napětím, které zapálí směs a dojde k výboji.

Vnější trubice má funkci chladiče. Chladičí systém odvádí nevyužitou energii, která se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. Chladičí okruh má dvě větve: vnitřní s deionizovanou vodou a vnější, kde proudí voda z vodovodní sítě nebo ze zásobníku s čerpadlem. [16, 36, 53]

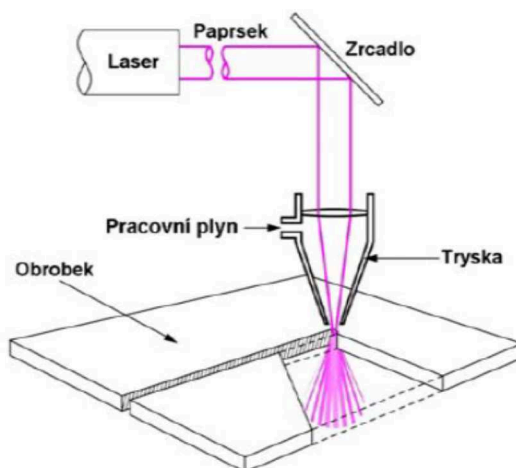
Laser generuje neviditelné infračervené záření o vlnové délce 10,6 μm . Skleněné optické materiály nepropouští toto záření, a proto musí být použity drahé optické komponenty, které tvoří soli s vrstvou naneseného kovu. Většinou se jedná o zrcadla vyrobená ze selenidu zinku (ZnSe), případně obsahují germanium (Ge) nebo speciální polovodičovou sloučeninu Galium arsenid (GaAs). Vysoké výkony musejí být přenášeny po optické cestě bez snížení kvality svazku a bez poškození komponentů. Proto jsou zrcadla chlazena. Kritickým faktorem je teplota chladicího média, protože ochlazení pod rosný bod může způsobit zničení optické součástky. U laseru s vysokým výkonem se kvůli odstranění nečistot a vlhkosti optická cesta proplachuje dusíkem. [16, 36, 53]



Obrázek 22: Konstrukce CO₂ laseru s podélným prouděním plynu [36]

5 Řezání (dělení) materiálů CO₂ laserem

Řezání a opracování laserem spočívá v přeměně energie světla na energii tepelnou. Působením tepla dojde k odtavení případně odpaření materiálu obrobku. CO₂ lasery se vyrábějí s výkonem do 20 kW s možností pracovat v kontinuálním i v pulsním režimu. Jsou vhodné pro kusovou, malosériovou i sériovou výrobu. [41]



Obrázek 23: Laserové řezání [7]

Výhodou tohoto beztržiskového způsobu dělení je, že umožňuje řezat velké množství různorodých materiálů a slitin nezávisle na jejich mechanických vlastnostech (například kov, textil, sklo, folie). Šířka řezu je v porovnání s jinými technologiemi velmi malá a stejně tak je zanedbatelná tepelně ovlivněná oblast. Laserovým paprskem lze dosáhnout jakéhokoli geometrického tvaru na ploše i v prostoru, a to i v případě křehkých a lehce deformovatelných komponentů. Díky vynikající kvalitě řezu a vysoké přesnosti už není nutná další úprava povrchu řezaného materiálu. [2, 5, 36]

Nevýhodou CO₂ laserů je, že vlnovou délku paprsku 10,6 μm nelze vést optickým vláknem a je nutné pro přenos záření použít zrcadla, která se musí kalibrovat a čistit. Přenos paprsku optickým vláknem lze provádět do vlnové délky cca 1 μm .

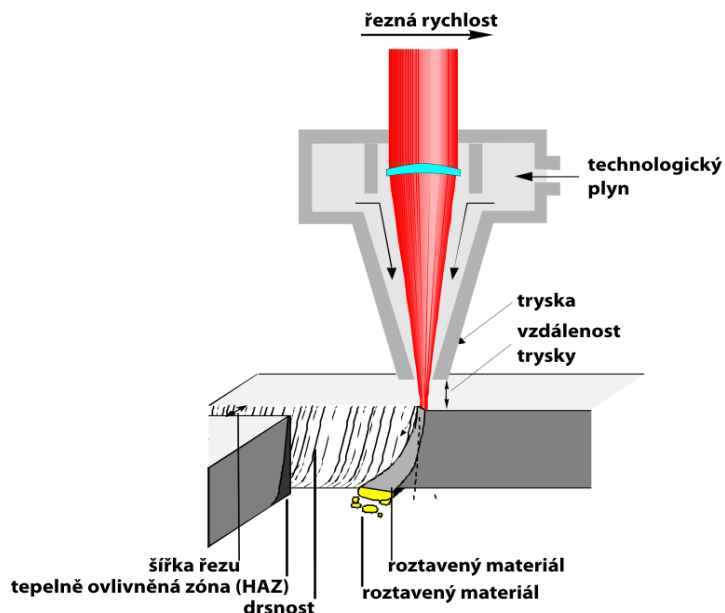
Vlnová délka limituje i možnosti použití laseru. Materiály s vysokou reflexivitou odrážejí určitá záření více a některá méně. Proto CO₂ laserem s vlnovou délkou 10,6 μm lze měď a její slitiny řezat jen velmi obtížně, a například zlato tímto laserem řezat není možné. Další nevýhodou CO₂ laseru je vysoká pořizovací cena stroje. [2, 8,41]

Z technologického hlediska existují dvě metody používané k dělení materiálu:

Řezání materiálů: dojde k průniku paprsku přes celou tloušťku materiálu - dělení kovů.

Tvorba drážky a následný lom: při dělení křehkých materiálů - skla, keramiky apod.

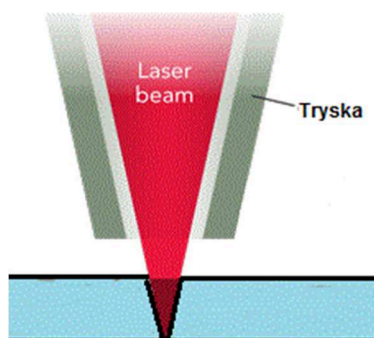
Při řezání kovů se používají CO₂ lasery většinou v kontinuálním (cw) režimu. Průchodem paprsku se materiál zahřívá, taví a poté odpařuje. Řezání laserem lze obecně dělit na tři procesy: tavné, oxidační, sublimační. Při samotném řezání nelze jednotlivé druhy řezání jednoznačně oddělit a dochází k vzájemné kombinaci procesů. [2, 8, 41]



Obrázek 24: Působení laseru na materiál [51]

5.1 Tavné vysokotlaké řezání

Při tavném řezání se používají netečné plyny, které nepodporují hoření a na tavném procesu se nepodílí. Nejčastěji se používá dusík, a to pro dělení korozivzdorných ocelí, vysoce legovaných ocelí, hliníku a nekovových materiálů. U korozivzdorných plechů lze tavné řezání použít do síly 15 mm. Při tavném řezání je možné ještě použít argon nebo helium. Při tavném vysokotlakém řezání se ohnisko umísťuje do spodní poloviny materiálu nebo na spodní hranu. [1, 8]



Obrázek 25: Umístění ohniska při tavném vysokotlakém řezání [49]

Plyn slouží k profouknutí drážky a k ochraně řezné hrany před vzduchem. Laserový svazek ohřívá dělený materiál na teplotu tavení, následně je vzniklá tavenina vytlačována proudem neaktivního plynu. Aby došlo k požadovanému profouknutí drážky a roztavený kov neulpíval na spodní hraně řezu, musí být tlak proudícího plynu velmi vysoký – 8 až 24 barů, což je přibližně pětkrát vyšší tlak než při oxidačním řezání. Protože dusík nedodává teplo z chemické reakce, tak je dosahovaná rychlost řezání nižší než u oxidačního řezání. [1, 8]

Dusík je netečný plyn, ale s určitými kovy, jako je např. titan, nikl, tantal, magnezium nebo zirkon, vytváří při vysokých teplotách nitridy a oxidy. Proto je při řezání některých neželezných kovů nutné použít i jiné, chemicky inertní plyny. Většinou se jedná o argon, výjimečně o helium. Tyto plyny chemicky nereagují s řezaným materiálem a zároveň řez chrání před účinky okolního vzduchu. Jestli je ochrana proti oxidaci dostatečná, se pozná na zabarvení řezu. Například u titanu je plně chráněný řez stříbrně lesklý, zabarvení do žluta nebo do modra značí, že okolní atmosféra reaguje s řezaným kovem. [2, 12, 43]

Dalším neželezným kovem, který se reže tavným způsobem, je hliník a jeho slitiny. Lze použít i kyslík, ale kvalita řezné hrany je pak výrazně horší. Při použití kyslíku vzniká povrchová vrstva oxidů, která má výrazně vyšší teplotu tání. Nízká tvrdost hliníku, která se využívá u konvenčního obrábění, není při řezání laserem výhodou. Hliník má v porovnání s ostatními kovy velkou tepelnou vodivost a pro vlnovou délku 10,6 μm vysokou odrazivost. Při použití CO_2 laseru s výkonem 3 kW lze řezat hliník do tloušťky 8 mm. Pro řezání hliníkových slitin jsou vhodnější pevnolátkové lasery.

Stejné doporučení platí i pro řezání mědi a jejích slitin. Vysoká odrazivost mědi dovoluje použít CO_2 laser jen do tloušťky 3 mm, a to jen v případě, že stroj je vybaven zařízením pro pohlcení odrazů. V případě řezání mědi je možné použít kyslík. [2, 12, 43]

5.1.1 Dusík

Dusík (N_2) není klasifikován podle zákona č. 350/ 2011 Sb. jako nebezpečná látka. Dusík je nehořlavý, netoxický, nevýbušný plyn bez chuti a zápachu, který kondenzuje na bezbarvou kapalinu. Získává se dělením s atmosférického vzduchu, kde má podíl 78%. Dusík se získává podchlazováním vzduchu a následnou několika násobnou destilací. Při tomto procesu se postupně odděluje kyslík (-183°C), argon (-186°C), a dusík (-196°C). [44, 45]

Čistota plynů se udává v procentech. Číslo má obvykle několik desetinných míst, takže značení je nepřehledné. Ke zjednodušení se používá mezinárodní systém, ve kterém je čistota označena pouze dvěma číslicemi. První číslo udává počet devítek v procentním vyjádření, číslo za tečkou je poslední číslo celkové hodnoty. [44, 45]

Pro dosažení kvalitních řezných hran se doporučuje, aby dusík měl čistotu s označením 5.0. Dusík se dodává v následujících kategoriích.

<i>Tabulka 1: Třídy čistoty dusíku</i>		
Třída	Čistota [%]	Použití
5.2	99,9992	Rezonátorový plyn pro CO ₂ lasery
5.0	99,999	Doporučená čistota pro tavné laserové řezání
4.8	99,998	Používá se jako levnější náhrada za třídu 5.0
4.6	99,996	Ochranná inertní atmosféra ve slévárenství
4.0	99,99	Používá se jako levnější náhrada za vyšší třídy
3.5	99,95	Používá se jako levnější náhrada za vyšší třídy

Plynný dusík se plní do ocelových lahví o objemu 20 nebo 50 litrů. Lahve mají pracovní tlak 200 bar nebo 300 bar. Při větším odběru se lahve s obsahem 50 litrů propojí do svazku, který má 12 nebo 16 lahví. Svazek umožňuje odebírat plyn ze všech lahví současně.

Při významnějším odběru je vhodné instalovat venkovní stacionární zásobník nebo používat kryogenní nádobu. Jedná se o dvouplášťové izolované nádoby s obsahem 120 až 1000 litrů. Z kryogenních nádob lze odebírat dusík v kapalně formě nebo po připojení odpařovače i v plynné podobě. Kapalný dusík je dodáván pouze v čistotě 5.0. Jeho cena je ale výrazně nižší než cena za dusík dodávaný v tlakových lahvích. Oproti svazku lahví mají kryogenní nádoby menší přepravní rozměry, a přitom zaručují větší bezpečnost při transportu. Jedinou nevýhodou kapalného dusíku je, že vlivem tepelných ztrát dochází k samovolnému odparu plynu. [44, 45]

5.1.2 Argon

Argon (Ar) není dle Zákona č. 356/2003 Sb. klasifikován jako nebezpečná látka. Je nehořlavý, netoxický, bezbarvý a bez chuti. Argon patří do skupiny vzácných plynů, protože v atmosféře jeho obsah nedosahuje ani 1%. Při řezání laserem se používá, protože nevytváří žádné chemické vazby a tedy nereaguje s řezanými materiály. Vzniklé hrany zpracované v atmosféře argonu jsou lesklé a bez oxidů.

Argon se stejně jako dusík dodává v plynné fázi v tlakových lahvích nebo kapalně fázi v kryogenních nádobách, a to ve třech třídách čistoty. [45, 59]

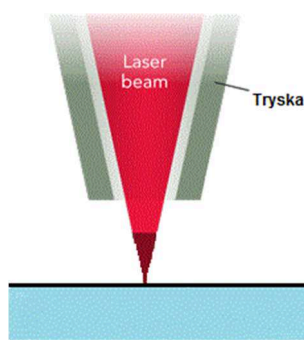
Tabulka 2: Třídy čistoty argonu		
Třída	Čistota [%]	Použití
5.0	99,999	Pro plynovou chromatografii a další speciální aplikace
4.8	99,998	Pro laserové a plasmové řezání reaktivních kovů (měď, titan)
4.6	99,996	Ochranná atmosféra pro svařování

5.1.3 Helium

Helium (He) je vzácný plyn, který se získává extrakcí ze zemního plynu. Jeho cena je vyšší než cena argonu a používá se jen výjimečně při požadavku na snížení tvorby plazmatu. Helium není klasifikováno jako nebezpečná látka dle zákona. 356/2003 Sb., přesto vznikají při jeho používání rizika, protože helium je dusivý plyn, který snižuje koncentraci kyslíku ve vzduchu. [45, 60]

5.2 Oxidační nízkotlaké řezání

Při této metodě je asistenčním plynem kyslík, který se přímo podílí na řezném procesu. Oxidační řezání se používá při dělení běžných konstrukčních ocelí do síly 30 mm. Povrch plechu je paprskem ohříván a následně spalován v proudu čistého kyslíku (exotermická reakce hoření železa). Roztavený kov tedy v místě řezu částečně shoří a částečně je odstraněn proudícím plynem. Tento způsob není vhodný pro zhotovování ostrých geometrických tvarů a malých otvorů. Oproti tavnému řezání je oxidační řezání dvojnásobně až trojnásobně rychlejší, má ale horší kvalitu řezu, vyšší drsnost povrchu a větší tepelně ovlivněnou oblast. Při oxidačním řezání se ohnisko umísťuje na povrch materiálu nebo nad materiál. [2,41, 45]



Obrázek 26: Umístění ohniska při oxidačním řezání [49]

V důsledku použití kyslíku vzniká v místě řezu oxidační vrstva. Při řezání plechů z korozivzdorné oceli by v důsledku oxidace mohlo dojít ke korozi v okolí řezné hrany a tedy k znehodnocení celého dílu. Pokud se ocel řezaná kyslíkem následně lakuje, je přilnavost laku v místech oxidační vrstvy ztížena. [2, 8, 41]

Při řezání materiálu do tloušťky 3 mm proudí kyslík do místa řezu pod tlakem 5 barů. Při tloušťkách od 3 do 10 mm je tlak okolo 1 baru a při řezání silnějších materiálů se tlak může ještě snížit. Jestliže se do řezné spáry dostává příliš mnoho kyslíku, a to z důvodu nízké rychlosti posuvu nebo kvůli velkému tlaku plynu, tak přebytečný kyslík v drážce hoří a zvyšuje teplotu řezání. Následkem je zhoršená drsnost povrchu větší TOO. Při oxidačním řezání má tloušťka materiálu na drsnost řezu zanedbatelný vliv. Čistota kyslíku by měla být 3.5. [2,12, 41]

5.2.1 Kyslík

Kyslík (O_2) je klasifikován dle zákona 356/2003 Sb., o chemických látkách jako látka oxidující. Z tohoto důvodu se při nakládání s kyslíkem musí respektovat informace uvedené v bezpečnostním listu. Kyslík není hořlavý, ale podporuje hoření.

V čistém kyslíku hoří i nehořlavé materiály, např. hliník, titan, železo, nebo křemík. Hrozí i nebezpečí výbuchu při kontaktu stlačeného kyslíku s mastnotou. Distribuce plynu je obdobná jako při dodávce dusíku. Pro technické účely se kyslík dodává ve dvou třídách čistoty. [42]

Tabulka 3: Třídy kyslíku		
Třída	Čistota [%]	Použití
3.5	99,95	tzv. laserový kyslík- pro laserové a plazmové dělení
2.5	99,5	tzv. technický kyslík pro kyslíko - acetylénové dělení, pájení

5.3 Sublimační řezání

Při sublimačním dělení materiálů se používá pulzní, velmi intenzivní laserový paprsek s vysokou hustotou svazku. Vnesené teplo způsobí okamžitý přechod materiálu z pevného skupenství do plynného. V intervalu mezi pulsy laseru unikají páry samovolně z místa řezu nebo jsou odstraněny slabým proudem inertního plynu.

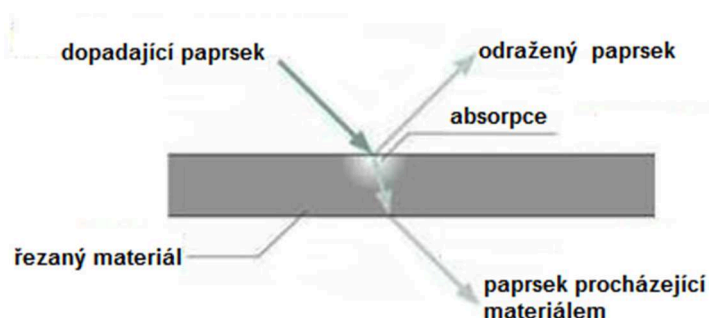
Sublimační řezání se používá pro materiály, které nemají stanovenou teplotu tavení. Jedná se o dřevo, papír, keramiku, některé plasty a kompozitní materiály. Sublimační řezání lze použít i při dělení velmi slabých plechů a folií, kdy tloušťka řezaného materiálu není větší než průměr paprsku. Toto omezení je nutné dodržet, aby vzniklé páry znovu nezkondenzovaly a nesvařily řez. Pulzní paprsek se využívá i při zhotovení malých děr do minerálů. [2, 12, 41]

6 Vlastnosti materiálu

Po dopadu paprsku na povrch materiálu se část paprsku odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde materiálem. Vedle nastavení parametrů stroje a charakteristiky paprsku mají tedy zásadní vliv na kvalitu řezu i některé vlastnosti materiálu. Tyto vlastnosti se se dají rozdělit do dvou skupin. Vlastnosti tepelně - fyzikální a vlastnosti chemické. [2, 12]

6.1 Vlastnosti tepelně - fyzikální

Mezi tyto vlastnosti se řadí reflektivita, absorpce, tepelná vodivost, plošné napětí a viskozita roztaveného kovu.



Obrázek 27: Absorpce a odrazivost laserového paprsku [20]

6.1.1 Reflektivita (odrazivost povrchu)

Reflektivita se značí **R** (reflectance) a udává se v %. Hodnota vyjadřuje schopnost materiálu odrážet světelné záření určité vlnové délky. Odrazivost infračerveného světla od kovů je relativně vysoká. V literatuře [2] je dohledatelná odrazivost oceli v rozmezí 93 až 96 %. Tato hodnota je ale zkreslená, protože platí pro leštěné povrchy. Odrazivost lze tedy částečně měnit úpravou povrchu, např. zdrsněním, nástřikem antireflexního povlaku, apod. Odrazivost dále ovlivňují povrchové vrstvy oxidů a zbytková napětí pod povrchem, která vznikla při tváření. Obecně platí, že se zvyšováním vlnové délky laseru reflektivita kovů stoupá. [2,12]

6.1.2 Absorpce

Absorpce materiálu se značí **A**, udává se v %. Je to schopnost materiálu pohlcovat laserové záření a tím měnit dodanou energii na teplo. To, jak materiál absorbuje světelné záření, přímo souvisí s teplotní vodivostí materiálu. Ohřátý materiál lépe absorbuje světelný svazek, takže při intenzivním záření dojde k postupnému tavení a vypařování kovu. Reflexe i absorpce jsou související jevy. Jejich provázanost vyjadřuje vztah 6.1 [2,12]

$$R + A = 100\%. \quad (6.1)$$

6.1.3 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Vyjadřuje rychlost, s jakou se teplo šíří ze zahřáté části do chladnějších částí. Tato vlastnost je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ . Pravý sloupec tabulky udává součinitel tepelné vodivosti pro některé kovy. Barevně je zvýrazněna vzrůstající reflektivita a současně vzrůstající tepelná vodivost. [2, 47]

Tabulka 4: Součinitele odrazivosti R [%] a součinitel tepelné vodivosti Λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]				
Materiál	R pro vln. délku λ 10,6 μm	R pro vln. délku λ 1,06 μm	R pro vln. délku λ 0,7 μm	souč. tepel. vodivosti λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
ocel	0,93	0,58	0,56	uhlíková 50, nerez 15
chrom	0,93	0,58	0,56	94
nikl	0,95	0,75	0,68	91
hliník	0,97	0,93	0,87	237
měď	0,98	0,91	0,82	386
stříbro	0,99	0,97	0,95	429

6.1.4 Plošné napětí a viskozita roztaveného kovu

Energie laserového svazku po dopadu na plech roztaví kov, který je odstraňován proudem plynu z řezné drážky. Tento proces ovlivňuje plošné napětí a viskozita roztaveného kovu. Tavenina s vysokou hodnotou povrchového napětí a nízkou viskozitou způsobuje, že se povrch roztaveného kovu chová jako elastická fólie a ulpívá na spodní hraně řezu. Tím vznikají otřepy. Aby k tomuto jevu nedocházelo, tak byly vyvinuty oceli vhodné k řezání laserem. Tyto ocele mají podíl legujících prvků, které zvyšují viskozitu a snižují povrchové napětí. [2,48]

6.2 Chemické složení

Materiály s větším procentem legujících prvků jsou hůře řezatelné než materiály s nízkým obsahem přídavných prvků. Proto lze nástrojovou ocel řezat vyšší rychlostí než ocel korozivzdornou. Vedle nežádoucích prvků v oceli jako je síra a fosfor, které přispívají ke vzniku vměstků a trhlin, ovlivňují řezatelnost i přísadové prvky. [12, 46]

Uhlík

Uhlík (C) se při řezání laserem projevuje nepříznivě. Jeho přítomnost ve slitině vede k zakalení řezné hrany. V tepelně ovlivněné zóně dochází ke zvýšení tvrdosti a vnitřního pnutí, a tedy i ke snížení plasticity, takže hrozí riziko upálení ostrých rohů. Při laserovém řezání by neměl obsah uhlíku přesáhnout 0,8 %. V nově vyvinutých ocelích pro řezání laserem se obsah uhlíku pohybuje okolo hranice 0,15%. [2, 43, 46]

Chrom

Zpracování korozivzdorné oceli ovlivňuje obsah chromu (Cr), který sice velmi dobře absorbuje laserovou energii, ale v materiálu tvoří z oxidovanou vrstvu, která zpomaluje řezání. Oxid chromu snižuje viskozitu taveniny, ta zůstává na spodní hraně řezu ve formě otřepu. [2, 43, 46]

Křemík

Zásadní vliv na laserové řezání má s pohledu chemického složení křemík (Si). Ten se do oceli přidává ke zvýšení pevnosti a tvrdosti a také proto, že působí dezoxidačně. Negativní projevy křemíku však při laserovém řezání převažují. Křemík způsobuje snížení tepelné vodivosti. Tím, že na sebe váže kyslík, nepříznivě ovlivňuje povrchové napětí. Snižuje viskozitu tavenin, což vede ke tvorbě otřepů a zhrubnutí řezu. Moderní materiály pro laserové řezání mají obsah křemíku do 0,03 %. [2,43, 47]

7 Vyhodnocení řezů provedených laserem

Při hodnocení kvality řezu lze zvolit ze dvou pohledů na danou problematiku. Ryze praktický pohled posuzuje výslednou hranu z vizuálního hlediska, kdy řez hodnotíme pouhým okem a hmatem a na základě zjištěných nedostatků měníme nastavení řezných parametrů, nebo časově náročnější posouzení podle normy ČSN EN ISO 9013, kterou na požádání firmy zjednodušeně vysvětluje kapitola 7.

7.1 Norma ČSN EN ISO 9013

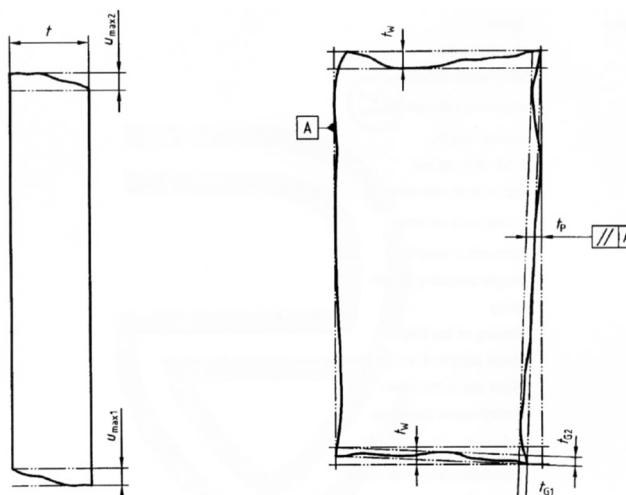
Tato norma je společná pro řezy provedené laserem, plazmou a při řezání kyslíkem (oxidační acetylenové řezání plamenem). Platnost normy je omezena tloušťkou materiálu. Norma se vztahuje na materiály o síle 0,5 - 40 mm při řezání laserem, 1 – 150 mm při řezání plazmou a na materiál o tloušťce 3 - 300 mm při řezání kyslíkem. Předmětem normy jsou řezy kolmé na povrch plechu i řezy šikmé a to u přímého i tvarového řezání. Norma posuzuje kvalitu řezu ve třech na sobě nezávislých kapitolách. V případě laserového řezání byly hodnoty stanoveny na základě řezání nelegovaných ocelí. [58]



Obrázek 28: Přímé řezání kolmé a šikmé, tvarové řezání kolmé a šikmé [58]

7.1.1 Úchylky tvaru a polohy

Zjednodušeně lze říci, že tyto úchylky porovnávají vnější kontury vyřezaného plechu s ideálním (naprogramovaným) stavem (kolmost, rovnoběžnost, přímost). [58]



Obrázek 29: Úchylky tvaru a polohy

7.1.2 Rozměrové úchytky

Tato část normy platí pro řezy provedené plazmou a kyslíkem. Na řezání laserem se nevztahuje. [58]

7.1.3 Stanovení jakosti povrchu řezu

Pro tuto diplomovou práci i pro firmu je nejdůležitější tato část kapitoly. Mezní úchytky pro kvalitu povrchu řezu jsou posuzovány nezávisle na výše jmenovaných úchytkách tvaru a polohy, aby se zdůraznily různé vlivy na zpracováváný kus. Tato kapitola nehodnotí finální výrobek, ale pouze samotný řez. Jakost povrchu řezu dle normy ČSN EN ISO 9013 se charakterizuje podle dvou hlavních a čtyřech doplňkových kritérií.

Hlavní kritéria jsou: Úchytky kolmosti nebo úchytky úhlu; označení u

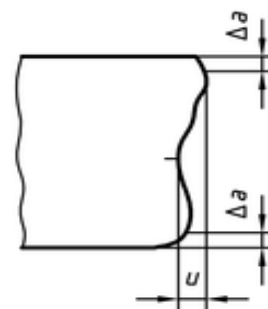
Průměrná výška prvků profilu Rz5

Úchytky kolmosti nebo úchytky úhlu; označení u

Kolmost a tolerance sklonu řezu je vzdálenost mezi dvěma rovnoběžkami, které ohraničují profil řezu. Protože každý tepelný řez je na horní a dolní hraně zúžen, norma zde stanovuje parametr Δa , který definuje prostor, kde posuzovaná úchytky kolmosti není měřena. Například u materiálu síly 12 mm bude z měření vyloučen 1 mm z horní i spodní strany řezu. Velikost Δa je uvedena v závislosti na tloušťce řezaného materiálu. Toleranční pole je rozděleno do pěti pásem, které jsou vypsány v tabulce č. 6, a jsou zobrazena v závislosti na tloušťce materiálu v grafu.

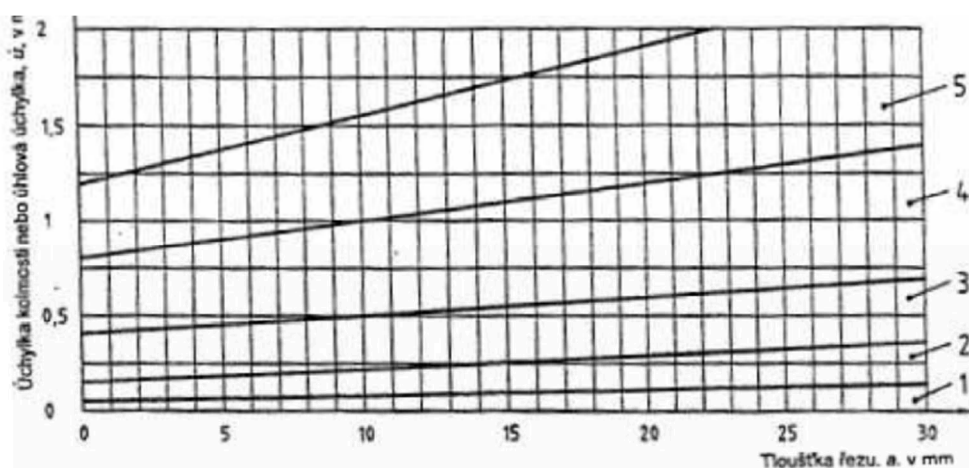
Přesná měření se provádí číselníkovým úchytkoměrem. Pro méně přesná měření se používá příložený úhelník. Do vzniklých mezer mezi úhelníkem a hranou řezu se vkládají listové spárové měrky nebo měřicí drát (Δa – zmenšení tloušťky řezu; u – úchytky kolmosti). [58]

Tabulka 5: Velikost parametru a	
Tloušťka materiálu [mm]	Δa [mm]
≤ 3	0,1
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5



Obrázek 30: Parametr Δa [58]

Tabulka 6: Hodnoty tolerančních polí	
Toleranční pole	Úchylka kolmosti [mm]
1	$0,05 + 0,003 a$
2	$0,15 + 0,007 a$
3	$0,4 + 0,01 a$
4	$0,8 + 0,02 a$
5	$1,2 + 0,035 a$



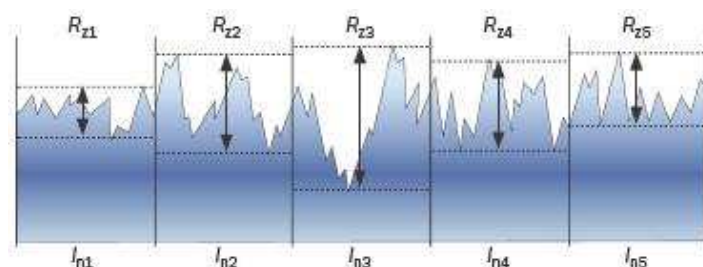
Obrázek 31: Toleranční pole parametru Δa [58]

Průměrná výška prvků profilu Rz5

Jedná se o aritmetický průměr největších výšek a hloubek profilů na pěti za sebou ležících úsecích v celkové délce 15 mm (5×3 mm). Hodnota Rz se tedy získá, že se v každé sekci sečte velikost největší prohlubně s největším výstupkem ($Rz_1 = Rp_1 + Rv_1$; atd.). Z hodnot jednotlivých sekcí se pak aritmetickým průměrem získá Rz5 (vzorec 7.1). Měření se provádí elektrickým dotykovým přístrojem. Hodnoty Rz se zařazují do 4 tolerančních polí. [57]

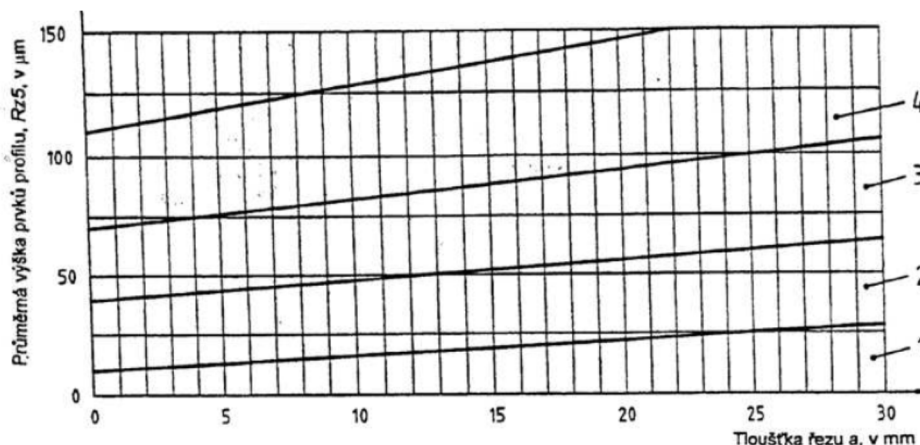
$$Rz = \frac{Rz_1 + Rz_2 + Rz_3 + Rz_4 + Rz_5}{5}$$

(7.1)



Obrázek 32: Stanovení a výpočet Rz5 [57]

Tabulka 7: Toleranční pole pro Rz5	
Toleranční pole	Průměrná výška profilu Rz [μm]
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$



Obrázek 33: Průměrná výška prvků profilu Rz5 - tloušťka materiálu do 30mm [58]

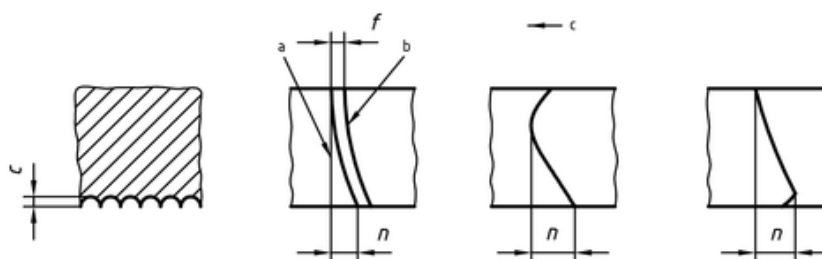
Jako doplňkové se používají další veličiny, které se již nezobrazují na kótovaný odkaz, ale norma pomocí nich dále charakterizuje kvalitu tepelného řezu. Jedná se o:

Skluz-označení n ; Nastavení horní hrany-označení r ; Drážkování; Šířky řezné spáry

Skluz; označení n

Skluz je definován jako vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Měří se příložným úhelníkem s posuvnými rameny, v laboratoři se používá mikroskop.[58]

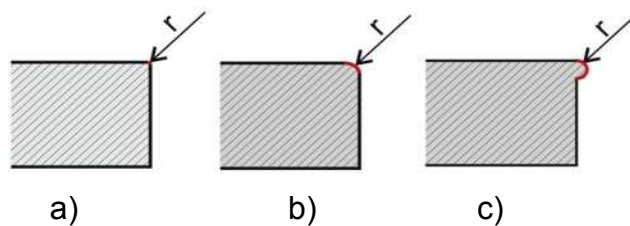
kde: a - referenční přímka n - vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy
 b - skluzová rýha C - velikost otřepů
 c - směr posuvu f - vzdálenost mezi body dvou skluzových rýh



Obrázek 34: Skluz definovaný normou 9013 [58]

Nastavení horní hrany; r

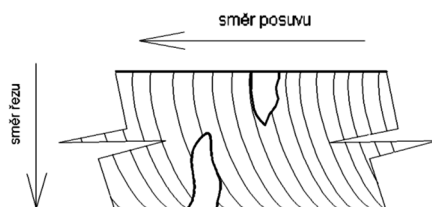
Veličina popisuje tvar horní hrany řezu.: a) Ostrá b) Natavená c) Převislá [58]



Obrázek 35: Tvar horní hrany [58]

Drážkování

Drážkování jsou nahodilé prohlubeniny nebo zářezy nepravidelné šířky a hloubky, které narušují stejnorodost povrchu. [58]

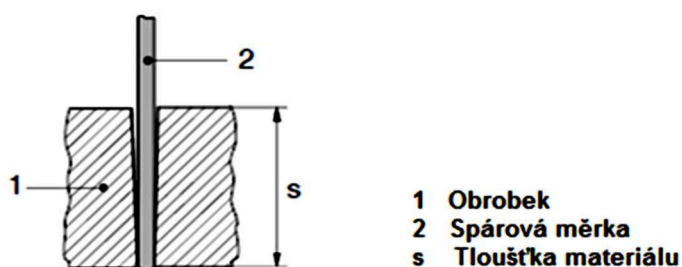


Obrázek 36: Drážkování [58]

Dle normy je možné posuzovat výskyt otřepů, natavených kapek a okují na dolní hraně řezu. Jejich hodnota není stanovena. Norma dále rozeznává veličinu „šířka řezné spáry“, kterou však nelze zahrnout do hodnocení jakosti povrchu řezu.

Šířka řezné spáry

Průchozí drážka vznikající při laserovém řezání se obvykle zužuje směrem do hloubky obrobku. Tento jev se nazývá podřezání. Objevuje se u plechů silnějších než 3 mm a se vzrůstající tloušťkou se zvětšuje. Hodnota podřezání se udává v milimetrech. Na měření šířky řezu se používají listové spárové měrky, měřící drát nebo vnitřní mikrometr. [58]

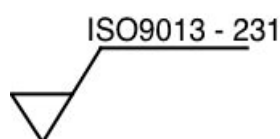


Obrázek 37: Podřezání hrany [58]

7.1.4 Značení jakosti povrchu na výkresové dokumentaci.

Ze šesti kritérií, která hodnotí jakost povrchu řezu, jsou dvě kritéria hlavní a čtyři doplňková. Hlavní kritéria „Úchylka kolmosti (u)“ a „Průměrná výška prvků profilu ($Rz5$)“ mají stanovená toleranční pole. Velikost tolerančních polí se zapisuje do výkresové dokumentace.

Kótovaný „odkaz struktury povrchu“ musí obsahovat číslo normy (ISO 9013). Za pomlčkou následuje číslice, která značí toleranční pole pro úchylku kolmosti (u); následující číslo označuje toleranční pole pro průměrnou výška prvků profilu ($Rz5$). V případě řezání plazmou nebo kyslíkem odkazová čára nese ještě třetí číslo, které značí toleranční pole rozměrových úchylek. Rozměrové úchylky se při laserovém řezání nepoužívají. [58]



Obrázek 38: Kótování tepelného řezu dle normy ČSN EN ISO 9013 [58]

7.2 Posouzení kvality řezu mimo normu 9013

Při zpracovávání jen několika druhů materiálů ve stále opakujících se tloušťkách lze předpokládat, že odladěné řezné parametry již nebude nutné měnit. Jak ale ukazují zkušenosti, každá tabule vykazuje kvalitativně jiný řez, a je tedy nutné vždy provést nové seřízení. Odlišnou kvalitu řezů způsobuje:

Povolené odchylky obsahu legujících prvků v materiálu

Povolené odchylky v tloušťce materiálu

Odlišná kvalita povrchu plechu - různá reflektivita

Teplotní rozdíly (počet řezů na plechu ovlivňuje teplotu tabule = odlišná absorpce)

V případě, že operátor neposuzuje řez podle normy, tak jej hodnotí pouze zrakem, hmatem, případně dílenskými měřidly. Touto metodou lze odhadnout drsnost povrchu, velikost otřepů a šířku řezné spáry. Další veličinou, která se dá zjistit jen v laboratorních podmínkách, je velikost tepelně ovlivněné zóny. Kvalitní laserový řez by měl mít hodnoty uvedené v tabulce. [1]

Tabulka 8: Parametry kvalitního řezu	
drsnost povrchu	Ra 3,6 μ m - 12 μ m
tepelně ovlivněná oblast	0,05 až 0,2 mm
šířka řezné spáry	0,2 až 0,5 mm

8 Úspora při nákupu a skladování dusíku

Zadání této diplomové práce vychází z potřeb firmy Cimbria HMD s.r.o., (dále jen firma). Týká se snížení spotřeby dusíku při dělení nerezových plechů různých tloušťek. Spotřeba dusíku není specifikována žádnou konkrétní hodnotou. Firma pouze udává, že spotřebované množství je příliš velké a náklady na nákup dusíku v roce 2014 činily cca 150.000 Kč měsíčně. Laser nemá instalovaný průtočný měřák na spotřebu procesního plynu a obsluha nepoužívá žádný výpočet pro zjištění konkrétní hodnoty.

Návrh řešení:

I. Snížení nákladů změnou kvality, dopravy a skladováním plynu

- snížení nákladů výhodnějším nákupem
- výpočet ceny v případě nákupu dusíku s nižší, ale dostačující čistotou.
- výpočet ceny při použití kapalného dusíku.
- výpočet ceny při použití dusíku z vyvíječe

II. Snížení spotřeby dusíku optimálním nastavením řezných podmínek

- následná doporučení ověřit pokusem

Představení firmy

CIMBRIA HMD, s.r.o. sídlí v Litomyšli. Její výrobní činnost spočívá ve vývoji, výrobě a servisu zemědělských strojů. Hlavními produkty jsou zařízení pro průmyslové moření osiv a jeho balení. Své výrobky dodává do zemí EU, ale i do USA, Argentiny a Číny. Firma vznikla pod názvem HMD v roce 1991. V roce 2002 došlo ke sloučení s dánskou firmou CIMBRIA, která se podílí na strategickém plánování a investicích. Výrobní program se po sloučení rozšířil o výrobu linek pro dopravu granulátů a výrobu paletizačních linek pro sypké materiály.

Množstevní jednotky plynu

Distributoři plynu včetně výrobců vyvíječů dusíku udávají množství plynu ve dvou odlišných jednotkách - $[\text{Nm}^3]$ a $[\text{Sm}^3]$. Tyto jednotky nejsou jednoznačně definovány. Výrobce generátoru dusíku Oxiwise udává následující interpretaci:

Nm^3 - Normální krychlový metr, při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a atmosférickém tlaku 1.01325 Bar

Sm^3 - Standardní krychlový metr, při teplotě $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a atmosférickém tlaku 1.01325 Bar [66]

Rozdíl mezi teplotami způsobuje, že Nm^3 je o 5,49% větší než Sm^3 . V jiném výkladu je rozdíl 8,9 %. Rozdíl v jednotkách je nutné vzít v úvahu při projektování systému, aby nedošlo k zakoupení systému s nižším průtokem. Pro praktické využití laseru nemají rozdílné jednotky žádný význam. Vzhledem k různým definicím i vzhledem k faktu, že pro potřeby diplomové práce není důležité, zda se jedná o Nm^3 nebo Sm^3 , je množství plynu značeno v m^3 .

Jednotky tlaku plynu

Základní jednotka tlaku v soustavě SI je $[\text{Pa}] = \text{N} / \text{m}^2$

Ve strojírenské praxi se používá jednotka $[\text{Mpa}] = \text{N} / \text{mm}^2$

V průmyslu se používá jednotka tlaku $[\text{bar}] = \text{N} / \text{cm}^2$

$$1 \text{ bar} = 0,1 \text{ Mpa} = 1 \text{ Kg} / \text{cm}^2 = 1 \text{ atm} = 100 \text{ kPa} [70]$$

Výrobce laseru Bystronik i dodavatelé plynů uvádějí jednotku tlaku bar. Hodnota tlaku je v diplomové práci uvedena pouze v jednotkách bar.

Cenové údaje

Všechny níže uvedené ceny jsou bez DPH a zaokrouhleny na celé koruny. Pro přehlednost zkratka „bez DPH“ není uvedena. Ceny byly zjišťovány v období říjen 2014 až duben 2015.

8.1 Snížení nákladů výhodnějším nákupem

Firma nakupuje jeden svazek lahví se stlačeným dusíkem včetně dopravy za cca 16.000 Kč. Jeden svazek má 12 lahví plněných pod tlakem 200 bar = 115,2 m^3 plynu.

$$16.000 \text{ Kč} \div 115,2 \text{ m}^3 = 139 \text{ Kč} / \text{m}^3$$

Jménem fiktivní společnosti jsem oslovil firmu Linde a požádal o cenovou nabídku na nákup svazků lahví se stlačeným dusíkem. Cílem bylo zjistit, jaká je cena běžná a jaké množstevní slevy lze vyjednat. Do poptávky jsem zadal, že odeberu pouze jeden svazek, s budoucím výhledem 8 -10 svazků měsíčně. Obdržel jsem nabídku, která při odběru jednoho svazku lahví včetně dopravy činila 15 399 Kč. Při telefonickém rozhovoru mi bylo řečeno, že s vyšším měsíčním odběrem cena výrazně klesá.

Ačkoliv firma odebírá 8 -10 svazků měsíčně a měla by dosáhnout na množstevní slevy, platí o 600 Kč víc než je cena, která mi byla nabídnuta při odběru jednoho svazku. Firma se při svých nákupech dohodne s dodavatelem na ceně, která platí celý kalendářní rok. Domnívám se, že tato strategie není pro firmu výhodná.

8.2 Snížení nákladů použitím dusíku nižší třídy čistoty

Dusík, který firma odebírá, má označení 5.0, což je nejčistší, ale také nejdražší plyn. Firma tak činí, protože takový požadavek na čistotu plynu je v návodu ke stroji a při instalaci stroje byly dodavatelem upozorněni, aby tuto čistotu plynu dodržovaly. Firma Linde nabízí i výrazně levnější dusík s označením 4.6, který má stejné vlastnosti jako třída 5.0. Jeho čistota je o tři tisíce procenta horší. Dále nabízí méně kvalitní, ale ještě levnější plyn třídy 4.0.

Většina výrobců strojů doporučuje dusík třídy 5.0, ale jelikož dusík třídy 4.6 a 4.0 zaručují bezoxidační řez, tak doporučuji vyzkoušet levnější variantu.

Tabulka 9: Vlastnosti dusíku podle třídy čistoty					
třída	čistota [%]	Oxidace řezu	Lesk řezu	Cena svazku	cena
5.0	99,999	zaručen bezoxidační řez	záruka lesklosti	15.399 Kč	139 Kč / m ³
4.6	99,996	zaručen bezoxidační řez	záruka lesklosti	9.360 Kč	81 Kč / m ³
4.0	99,99	zaručen bezoxidační řez	BEZ záruky lesku	7.085 Kč	62 Kč / m ³

8.3 Snížení nákladů odběrem dusíku z kryogenní nádoby

Další možností, která je výrazně levnější, je dodávat dusík v kapalně formě, který má deklarovanou čistotu 5.0. Používá se přenosný, tepelně izolovaný zásobník na tekutý dusík, který zaručuje, že plyn zůstane v tekuté fázi. Přenosný zásobník nevyžaduje žádné dodatečné energetické zdroje, tzn., že nepotřebuje kompresor nebo chlazení a funguje na principu ohromné termosky. Je umístěn na paletě stejně jako svazek lahví a má podobné nebo menší prostorové nároky. Manipulace se provádí vysokozdvížným vozíkem.

Zásobník s tekutým dusíkem musí mít vzduchový odpařovač, který převede kapalný dusík na plyný. Cena za pronájem odpařovače i zásobníku je 11-15 tisíc ročně, což je obdobná částka, která se účtuje za pronájem svazku lahví (13-14 tisíc ročně). Z důvodu zanedbatelného rozdílu nebudu cenu za pronájem nadále zohledňovat ve svých kalkulacích.

Na můj dotaz, proč firma nepoužívá kapalný dusík, mi jednatel firmy odpověděl, že to nepovolují požární a bezpečnostní předpisy z důvodu výbušnosti dusíku. Předpokládám, že zde muselo dojít k nedorozumění, protože tekutý dusík nejenže není hořlavý a výbušný, ale používá se jako hasící prostředek (kapitola 5.1.1).

Hlavní výhodou plynů v kapalném skupenství je jejich mnohokrát menší objem v porovnání s plyným stavem. To výrazně usnadňuje a z hospodárňuje jejich přepravu a skladování. Zásobník obsahuje 600 litrů tekutého dusíku.

1 litr kapalného dusíku = 0,691 m³ plynu

$$0,691 \text{ m}^3 \times 600 \text{ litrů} = 414,1 \text{ m}^3 \text{ plynu}$$

Z jedné náplně tekutého dusíku vznikne 414,1 m³ plynného dusíku.

1 litr kapalného dusíku stojí 18,70 Kč.

Naplnění zásobníku stojí: 18,70 Kč × 600 litrů = 11.220 Kč.

$$11.220 \text{ Kč} \div 414,1 \text{ m}^3 = 27.09 \text{ Kč} / \text{m}^3$$

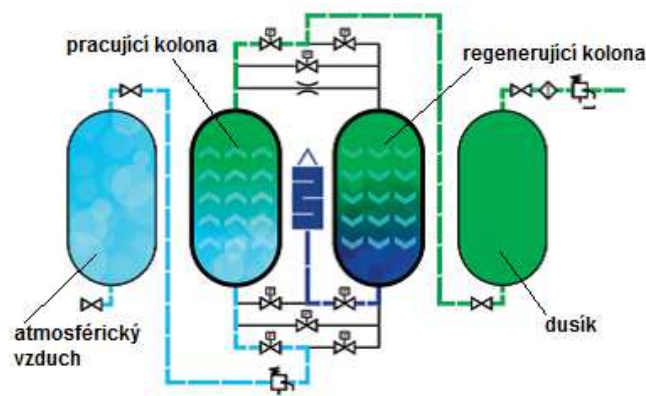
Cena m³ dodávaného v tekutém stavu je 27.09 Kč / m³, což je o 80 % nižší cena oproti plynu dodávaného ve svazku lahví.

8.4 Snížení nákladů pomocí vyvíječe dusíku

Další alternativou je získávání dusíku z atmosféry pomocí vyvíječe. Generátory dusíku se dělí podle principu na membránové generátory a na PSA generátory.

Membránové generátory používají svazky dutých vláken, které jsou v membránovém modulu. Duté vlákno má vysokou propustnost, takže dochází k průniku kyslíku, CO₂ a dalších látek do atmosféry. Uvnitř dutého vlákna zůstává pouze dusík, který proudí přes regulační armatury do vzdušníku. Membránové generátory produkují dusík o nižší čistotě, používají se v méně náročných provozech (např. pneuservisy pro huštění pneumatik). [64]

PSA generátory pracují pomocí tlakové cyklické adsorpce molekul kyslíku. Tyto generátory mají dvě pracovní části, tzv. kolony, které se pravidelně střídají v provozu. Jedna kolona pracuje a druhá regeneruje. Každá kolona má uhlíkové molekulární síto, na kterém se při zvýšeném tlaku zachytávají molekuly kyslíku a další nežádoucí látky. Po zaplnění síta dojde automaticky k přesměrování proudícího vzduchu na druhou kolonu. V první koloně se začne „čistit síto“, protože v důsledku poklesu tlaku se molekuly kyslíku uvolní a uniknou do atmosféry. [64,68]



Obrázek 39: Schéma vyvíječe dusíku [68]

Čistota plynu je monitorována a zobrazuje se na displeji. Generátory PSA jsou vhodné pro náročné aplikace, protože dodávají dusík plynule s vysokou třídou čistoty. Nevýhodou je, že potřebují více stlačeného vzduchu (tedy výkonnější kompresor) než membránové generátory. Pro výrobu 1 m³ dusíku je nutné dodat 3 - 4,8 m³ vzduchu. Čistota generovaného dusíku se pohybuje v rozmezí 95 % až 99,9995 % (třída 1.5 - 5.5). S vyšší dosaženou čistotou plynu se proces zpomaluje, a tím vzrůstá ekonomická náročnost provozu. [65,68]

8.4.1 Generátor LaserGas 9-300

Pro volbu vyvíječe je zásadní požadovaná kapacita. Jestliže firma spotřebuje 10 svazků lahví měsíčně, tak průměrně spotřebuje 1152 m³ dusíku.

Jménem firmy Cimbria HMD s.r.o., jsem oslovil firmu Oxiwise s žádostí, aby učinili předběžnou cenovou nabídku na generátor dusíku, který by vyhovoval potřebám firmy. To znamená, aby měl vyvíječ vyšší kapacitu, než je průměrná spotřeba firmy a aby kvalita dusíku byla v dostatečné čistotě zabezpečující bezoxidační řez - třída 4.0 a vyšší.

Firma Oxiwise nabídla generátor LaserGas 9-300, který vyvinula přímo pro potřeby laserového řezání. Minimální dosahovaná čistota dusíku je 4.0 při denní kapacitě 216 m³. Generátor pracuje bezobslužně zcela automaticky. Při nízkém odběru dusíku generátor ukládá plyn do svazku tlakových lahví, takže vzniká rezerva pro případ většího odběru plynu. Kapacita vyvíječe převyšuje průměrnou měsíční spotřebu pětinaásobně. Sestava se skládá z následujících částí:

1. Šroubový kompresor Kaeser SM 12 s cyklonovým filtrem, pracovní tlak 8 bar
2. Sušička vzduchu SPL 024, průtok 144 m³ / h
3. Vzduchový tank, 200 L
4. PSA generátor dusíku, 2 kolony
5. Buffer (nárazníkový) zásobník 200 L včetně prachových filtrů a regulátoru tlaku
6. Řídicí systém s Siemens s dotykovým displejem, senzor čistoty
7. Zásobník dusíku-svazek lahví-12 × 50 L, 300 bar [64, 65]



Obrázek 40: Vyvíječ dusíku – LaserGas 9-300- technologie PSA [65]

8.4.2 Výpočet ceny dusíku z vyvíječe

Příkon celé sestavy činí 1,5 kWh / m³. Při průměrné ceně 4,75 Kč za 1 kWh jsou náklady na jeden krychlový metr dusíku 7,12 Kč.

Generátor je schopný produkovat 216 m³ za den, tzn. 9 m³ za hodinu. Po 3000 hodinách provozu je nutné vyměnit vzduchové a olejové filtry a provést běžnou údržbu kompresorů. Firma Oxiwise tuto pravidelnou údržbu oceňuje částkou 1500 EUR, což při kurzu 27,42 Kč za euro v přepočtu činí 41.130 Kč. Jestliže uvedenou částku rozdělím na každý m³ dusíku vyrobený během 3000 hodin, náklady na jeden metr krychlový dusíku vzrostou o 0,64 Kč. [67,69]

$$3.000 \text{ hodin} \times 9 \text{ m}^3 \div 41.130 \text{ Kč} = 0,66 \text{ Kč/m}^3$$

$$0,66 + 7,12 = 7,78 \implies \mathbf{8 \text{ Kč} / m^3}$$

Po sečtení a zaokrouhlení je konečná cena 8 Kč za m³ dusíku.

Pořizovací cena celé soustavy, včetně dopravy, montáže a zaškolení obsluhy je 46,951 eur, tzn., **1.287.396 Kč**. Cenová nabídka je v příloze A.

8.5 Konečné ceny dusíku podle formy dodání

V následující tabulce jsou vyčísleny ceny plynu, které je možné použít pro laserové řezání.

Tabulka 10: Ceny dusíku podle třídy čistoty a podle způsobu dodání				
třída	Oxidace řezu	Lesk řezu	forma dodání	cena
5.0	zaručen bezoxidační řez	záruka lesklosti	svazek lahví	139 Kč / m ³
4.6	zaručen bezoxidační řez	záruka lesklosti	svazek lahví	81 Kč / m ³
4.0	zaručen bezoxidační řez	bez záruky lesku	svazek lahví	62 Kč / m ³
5.0	zaručen bezoxidační řez	záruka lesklosti	kryogenní zásobník	27 Kč / m ³
4.0	zaručen bezoxidační řez	bez záruky lesku	vyvíječ dusíku	8 Kč / m ³

9 Snížení spotřeby dusíku nastavením řezných podmínek

Stroj, který firma zakoupila a na kterém byly provedeny pokusy, je 14 let starý, repasovaný CO₂ laser Bystronic BTL 3000. Technické parametry včetně obrázku stroje jsou v příloze B.

Původní řezné podmínky

Cílem této části diplomové práce je nalézt takové nastavení stroje, které povede ke snížení spotřeby dusíku se zachováním nebo zlepšením kvality řezu. Za účelem porovnání jakosti řezu jsem vyřezal kontrolní vzorky podle nastavení, které programátor a obsluha běžně používá.

Tabulka 11: Původní parametry řezu použité při řezání AISI 304 (ČSN 17240)					
Síla materiálu [mm]	Ohnisko [mm]	Tlak plynu [bar]	Ø trysky [mm]	Řez. rychlost [m/min]	Výkon [%] 100 % = 3 kW
1	+1,3	12	1,5	9	90
2	+2	12	1,5	6,2	95
3	+2,5	11	1,75	3,8	100
4	+1,6	14	2	2,5	100
5	+3,5	15	2	2	100
6	+3,6	15	2,5	1,38	100
10	+8,5	14	3	0,45	100

V tabulce chybí vzdálenost nastavení trysky od plechu. Je to z toho důvodu, že operátor ani programátor s touto hodnotou doposud nepracovali. Nevědí, na jakou vzdálenost je tryska nastavena, a dosud netušili, že vzdálenost trysky od plechu je řezný parametr.

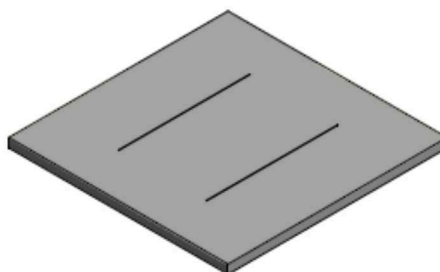
Protože kvalitu řezu ovlivňuje šest parametrů, je tato část diplomové práce členěna do šesti kapitol. V každé je uvedeno původní nastavení příslušného parametru, které následně hodnotím dle dostupných informačních zdrojů. Po teoretickém zhodnocení následuje vlastní pokus, který je v případě potřeby doložen fotografiemi. Protože slovně posuzovat kvalitu řezu lze velmi obtížně, tak jsem každému pokusu přiřadil známku, jako při školním hodnocení. Posloupnost kapitol odpovídá pořadí, podle kterého se nastavují parametry při řezání dusíkem. Ke kontrolním řezům jsem použil korozi-vzdornou ocel AISI 304 (ČSN 17240) v tloušťkách 1; 2; 3; 4; 5; 6; 10 mm.

Materiál AISI 304

Materiál, který firma na svém CO₂ laseru převážně řezá, je korozivzdorná ocel s obchodním označením AISI 304. Firma ji používá pro její odolnost proti chemickým látkám a nízké ceně. Jedná se o chromnikovou ocel, jejíž austenitická gama fáze způsobuje, že ocel je nemagnetická. Nízký obsah uhlíku zaručuje svařitelnost materiálu. Odolnost proti korozi lze zvýšit povrchovým leštěním. [52]

Tabulka 12: Označení oceli a její chemické složení.								
obchodní označení					AISI 304			
označení dle ČSN:					17 240			
označení podle DIN:					1.4301			
označení dle chemického složení					X5CrNi18 -10			
C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Ti
[%] max	[%]	[%]	[%]	[%] max	[%]	[%]	[%] max	[%]
0,06	17 - 20	8,5 - 10	-	1	2	0,045	0,03	-

Řezaný vzorek má tvar čtverce s délkou hrany 100 mm, ve kterém jsou dva rovnoběžné řezy, abych mohl porovnávat i otřepy při propalu a šířku řezné drážky.

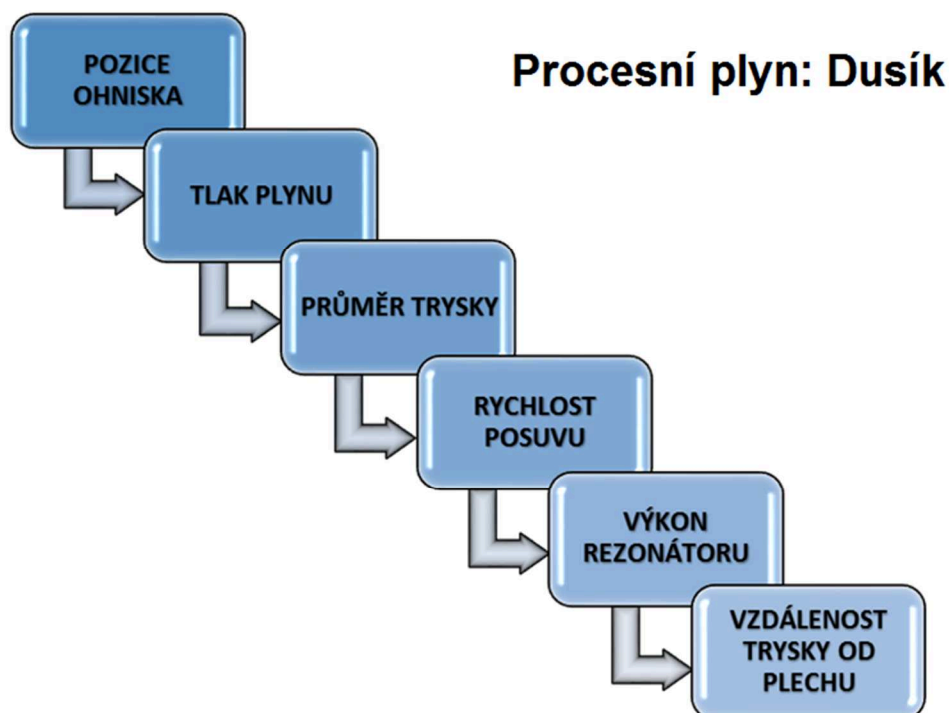


Obrázek 41: Vzorek řezaného materiálu

Pořadí nastavení řezných parametrů

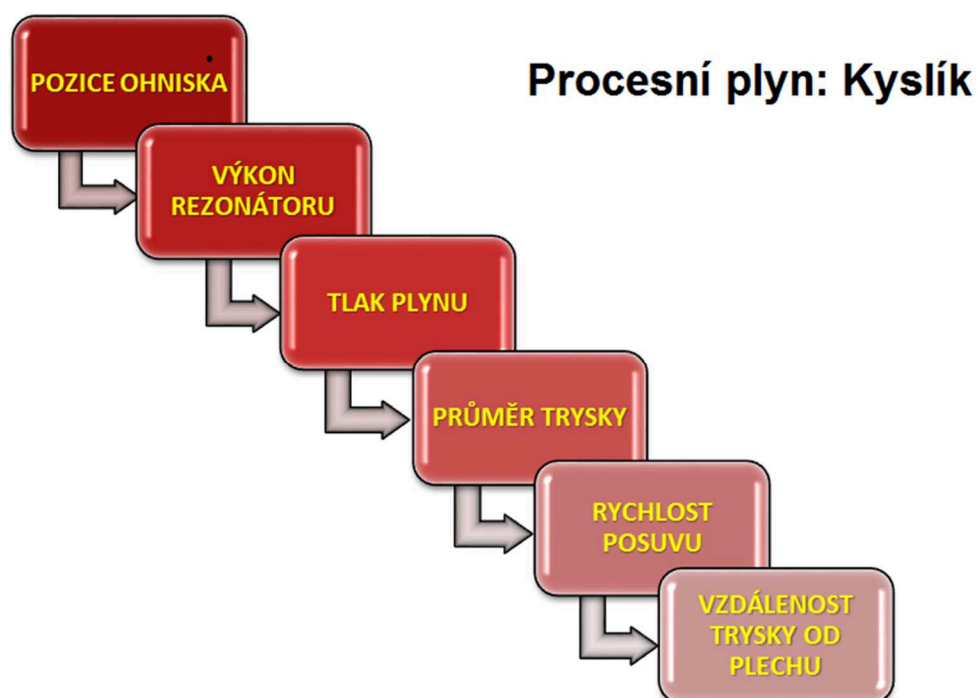
Stroj v reálném čase vyhodnocuje přibližně 80 parametrů. Mnoho hodnot je definováno výrobně a nelze je u daného laseru změnit. Pro vlastní řezání je zásadních šest nastavitelných parametrů, které se nastavují v částečně odlišném pořadí, a to v závislosti na použitém procesním plynu. Pro najetí optimálních řezných podmínek je dodržení pořadí naprosto zásadní. [12]

Pořadí nastavení parametrů při řezání dusíkem je znázorněno v grafu 1. Podle tohoto schématu byly provedeny praktické pokusy. Teprve až po nalezení správné hodnoty u prvního parametru, je možné nastavovat druhý parametr, následně třetí atd.



Graf 1: Postup při hledání optimálních řezných podmínek při použití dusíku

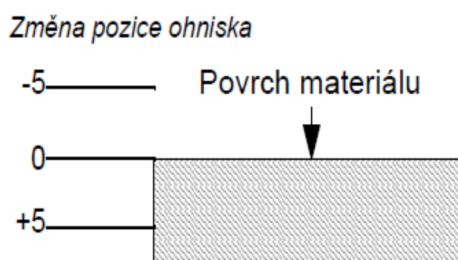
Také u oxidačního řezání je nalezení správné polohy ohniska zásadní. Pořadí ostatních parametrů je však odlišné. Je to způsobeno tím, že kyslík se přímo podílí na chemické reakci, která probíhá při řezání.



Graf 2: Postup při hledání optimálních řezných podmínek při použití kyslíku

9.1 Parametr č. 1 – Nastavení ohniskové roviny

Pozice ohniska má zásadní vliv na kvalitu řezu. Povrch plechu je označován jako hladina nula. To znamená, že ohnisko pod horní hranou (tedy uvnitř materiálu a pod ním) je označováno kladnou hodnotou. Je-li ohnisko nad plechem, tak je stav popsán zápornou hodnotou. Je-li ohnisko přímo na povrchu plechu (hladina 0), tak dojde k největšímu energetickému ovlivnění materiálu laserovým paprskem. Jestliže je ohnisko příliš vysoko nad povrchem, nebo naopak příliš nízko pod plechem, tak se rozšíří řezná spára a zvětší se tepelně ovlivněná oblast.



Obrázek 42: Umístění ohniskové roviny [12]

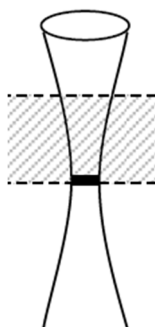
Pozice ohniskové roviny závisí především na použitém procesním plynu:

Při použití kyslíku se u slabších plechů (do 6 mm) umísťuje ohnisko na povrch plechu.

U silnějších plechů (8 mm a více) se ohnisko situuje nad povrchem materiálu.

Při použití dusíku se podle základního pravidla ohnisko umísťuje na spodní hranu plechu.

Tato obecná poučka ale v praxi příliš neplatí, protože každá tloušťka plechu vyžaduje jinou polohu ohniska.



Obrázek 43: Základní umístění ohniska při tavném řezání [63]

Transparence (propustnost) fokusační optiky

Polohu ohniska významně ovlivňuje i stav čočky. Fokusační optika stárne a ztrácí své původní vlastnosti. Stará nebo znečištěná čočka se důsledkem zvýšené absorpce laserového záření zahřívá. Toto zahřívání vede k tomu, že se mění její lomivost, tím se posune poloha ohniska nahoru i o několik mm. Toto případné posunutí má nepříznivý vliv na přesnost řezu. [53]

Teorie o nastavení ohniska

Na umístění ohniska při tavném řezání nahlíží tři teorie. Základní pravidlo uváděné v literatuře ustavuje ohnisko na spodní hranu při jakékoliv tloušťce plechu. Je to z důvodu, že se tak do řezu dostane větší množství plynu, který lépe odstraní přetavený materiál. Umístění ohniska u spodní hrany příznivě ovlivňuje kolmost řezu.

Druhá teorie zastává názor, že při použití inertního plynu se ohnisková rovina umísťuje do 1/3 od spodní hrany materiálu, a to z důvodu, že se do řezu dostane více tepla, než když je ohnisko na spodní hraně.

Třetí pohled na danou problematiku předpokládá, že jestliže je materiál slabší (do 4 mm), tak není nutné odstranit velký objem taveniny, a proto je vhodné ohnisko umístit výše tzn. na povrch plechu. Větší rozbíhavost paprsku a z toho důvodu i zhoršená kolmost řezu je u slabých plechů zanedbatelná.

9.1.1 Původní nastavení ohniskové roviny

Abych došel ke konkrétním závěrům, tak jsem výše popsaná doporučení porovnal s hodnotami a vzorky, které byly vyřezány pro kontrolní účely podle původního nastavení.

Tabulka 13: Původní nastavení ohniska a dosažená kvalita řezu		
Síla materiálu [mm]	Umístění ohniska [mm]	Hodnocení řezu
1	1,3	bez otřepů
2	2	bez otřepů
3	2,5	bez otřepů
4	1,6	bez otřepů
5	3,5	mírný otřep
6	3,6	velký otřep
10	8,5	velký otřep a natavená hrana

U materiálu s tloušťkou 1 mm je ohnisko umístěno ve vzdálenosti 1,3; což je 0,3 mm pod spodní hranou obrobku. Energeticky nejvýkonnější část paprsku je umístěna pod materiálem. Předpokládám, že při takto nastaveném ohnisku dochází k porušení roštu. Takto umístěné ohnisko neodpovídá žádné teorii. Řez je však bez otřepů a bez nutnosti další úpravy.

U materiálu síly 2 mm je ohnisko na spodní hraně plechu, u plechu síly 3 mm je ohnisko 0,5 mm od spodní hrany, což odpovídá obecné poučce o umístění ohniska na spodní ploše materiálu.

Ohnisko u tloušťky 4 mm je jako jediné v horní polovině plechu. Kvalita řezu byla dobrá a bez otřepů.

U síly materiálu 5 mm a 6 mm bylo ohnisko umístěno přibližně dle teorie v 1/3 tloušťky od spodní strany plechu (maximální rozdíl činí 0,4 mm).

U materiálu 6 mm a 10 mm vznikly na spodní hraně velmi tuhé otřepy, které měly přibližnou výšku 0,7 mm a je nutné je zabrousit ruční úhlovou bruskou.

9.1.2 Pokus č. 1 – Nové nastavení ohniskové roviny

Pro potvrzení či vyvrácení výše popsaných teorií jsem ohnisko umístil postupně podle jednotlivých tvrzení. Firma si vyžádala, že pokusy provedu na nejčastěji používaném materiálu o síle 4 mm. Nejdříve jsem provedl řez dle původního nastavení, poté s ohniskem v 1/3 od spodní hrany, a pak v bodě 0. Ostatní řezné parametry zůstaly na původní hodnotě.

Posuzoval jsem kvalitu řezu, tzn. otřepy na spodní hraně. Řez bez otřepů je hodnocen známkou 1, v případě že se na hraně objeví otřep, který je odstranitelný rukou nebo brusným kamenem, tak řez hodnotím známkou 2. Jestliže otřep musel být odstraněn pilníkem nebo ruční úhlovou bruskou, tak dostal známku 3 - 5.

Pro lepší orientaci v tabulkách je **odzkoušený parametr označen tmavým odstínem**, **zkoušený parametr má světlejší odstín** a původní nastavení zůstalo neoznačené.

Tabulka 14: Hodnocení řezu při změně ohniska (síla materiálu: 4 mm) - pokus č. 1			
ohnisko: pokus		řezná rychlost: 2,5 m / min	
tlak plynu: 14 bar		výkon laseru: 100%	
průměr trysky: 2 mm		výška trysky od plechu: 1 mm	
vzorek	umístění ohniska	hodnocení	známka
1 A	+1,6 původní nastavení	kvalitní řez bez otřepů	2
1 B	+2,6 1/3 tloušťky od spodu	mírné otřepy v drážce	3
1 C	0 více tepla do řezu	veliké otřepy na hraně i v drážce	5
1 D	+2 nejlepší nastavení	kvalitní řez bez otřepů	1

9.1.3 Hodnocení pokusu č. 1

Pokus prokázal, že pro nastavení ohniska neplatí žádná výše jmenovaná teorie.

Původní nastavení na hladině + 1,6 mm vykazovalo relativně kvalitní řez se známkou 2.

Ohnisko v 1/3 od spodní plochy na hladině +2,6 způsobilo velmi mírné, lehce odstranitelné otřepy (obrázek 44). Posouvat ohnisko ještě níž jsem považoval za zbytečné.

Umístění ohniska na povrchu materiálu se ukázalo jako nesmyslné a pro korozivzdornou ocel o síle 4 mm nelze doporučit. (obrázek 45)

Nejkvalitnější řez byl proveden s ohniskem uprostřed materiálu na hladině + 2 mm.



Obrázek 44: Vzorek 1 B - Ohnisko v 1/3 tloušťky od spodní hrany



Obrázek 45: Vzorek 1 C - Ohnisko na hladině nula

9.2 Parametr č. 2 - Nastavení tlaku plynu

Volba procesního plynu závisí na druhu řezaného materiálu.

Kyslík: pálení konstrukční oceli.

Dusík: řezání korozivzdorné oceli, hliníku, PVC, plexisklo

Argon: řezání mědi, mosazi, niklu, titanu, zirkonu, magnezia

Stlačený vzduch: řezání konstrukční oceli

řezání s kyslíkem (O₂)	tlak 0,5 - 6 bar => nízkotlaké řezání. Vyšší hodnota tlaku při řezání kyslíkem způsobí vyšší teplotu řezání a z toho důvodu hrubší plochu řezu.
řezání s dusíkem (N₂)	tlak plynu 8 - 20 bar => vysokotlaké řezání. Příliš nízký tlak způsobuje otřepy na spodní hraně řezu. Příliš vysoký tlak zlepšuje kvalitu řezu, ale prodražuje řezání a ochlazuje materiál. Pro nekovové hořlavé materiály se používá jako ochrana proti vznícení a proti opálení hran.
řezání s argonem (Ar)	tlak plynu 8 - 20 bar => vysokotlaké řezání. Používá se pro kovy, které reagují z dusíkem.
řezání s heliem (He)	vysokotlaké řezání, při požadavku na snížení tvorby plazmatu.
řezání se stlačeným vzduchem	max. tlak 12 bar, snížení rychlosti i kvality řezu, vznik náběhových barev u austenitických ocelí.

9.2.1 Výpočet spotřeby dusíku

Protože cílem této diplomové práce je ekonomická úspora při tavném řezání za použití dusíku, je nutné tuto spotřebu konkrétně vyčíslit.

Spotřeba řezného plynu závisí na tlaku plynu a průměru trysky. Tyto dvě hodnoty ovlivňují tvorbu otřepů a drsnost řezné plochy. Snahou je, aby řez měl odpovídající kvalitu za použití co nejmenšího množství dusíku. Profesor Mrňa uvádí [35], že průměrná spotřeba dusíku při tlaku 15 bar je 50 m³ za hodinu. Tato hodnota je však pouze orientační, protože údaj neuvádí průměr trysky.

V případě, že stroj má průtokový měřák plynu, tak je možné spotřebu plynu odečíst po provedení řezu. Výhodnější ale je průtok plynu vypočítat ještě před začátkem řezu, aby bylo možné ekonomicky zhodnotit případné zvýšení či snížení tlaku nebo průměru trysky. Pro modelový výpočet jsem zvolil trysku o průměru 2 mm, tlak plynu 15 bar. Uvedené vzorce lze použít i pro výpočet spotřeby kyslíku, argonu nebo stlačeného vzduchu.

Veškeré vzorce této kapitoly jsou čerpány z: BOHL, W.: Technische Strömungslehre. Würzburg : VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1984, 275 s. 6. vydání, Bestellnummer: 547- 066-3 [15]

a) Výpočet hustoty dusíku

při běžném atmosférickém tlaku a teplotě 20 °C

$$\rho_2 = \frac{P_2 \cdot M}{R \cdot T} \quad (9.1)$$

$$\rho_2 = \frac{101325 \cdot 28,01 \times 10^{-3}}{8,314 \cdot 293} = 1,16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

při tlaku 15 bar

$$\rho_1 = \frac{(P_1 + P_2) \cdot M}{R \cdot T} \quad (9.2)$$

$$\rho_1 = \frac{(1500000 + 101325) \cdot 28,01 \times 10^{-3}}{8,314 \cdot 293} = 18,41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

hustota dusíku při běžném tlaku a teplotě 20°C	ρ_2	[kg · m ⁻³]
hustota plynu při tlaku 15 bar	ρ_1	[kg · m ⁻³]
tlak plynu 15 bar	P 1 = 1,5 × 10 ⁶	[Pa]
atmosférický tlak (smluvní hodnota)	P 2 = 101 325	[Pa]
Molární hmotnost dusíku	M = 28,01 · 10 ⁻³	[kg · mol ⁻¹]
univerzální plynová konstanta	R = 8,314	[J · mol ⁻¹ · K ⁻¹]
teplota 20 °C	T = (273+20)=>293	[K]

b) Výpočet průřezu trysky:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (9.3)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3,1415 \text{ mm}^2 = 3,1415 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

průřez trysky S [m²]

průměr trysky d = 2 [mm]

c) Výpočet výtokové funkce

Pro zjištění výtokové funkce je nutné porovnat působící tlaky P_2/P_{abs} s kritickým poměrem tlaku 0,528. Tlak absolutní je součet tlaku v zásobníku a tlaku atmosférického.

$$\frac{P_2}{P_{abs.}} = \frac{101325}{1601325} = 0,0632 < 0,528 \rightarrow \text{nakritické proudění} \rightarrow \Psi = 0,484 \quad (9.4)$$

Protože poměr tlaků P_2 / P_{abs} je menší než kritický poměr tlaků 0,528, jedná se o nadkritické proudění, při kterém je u dvou atomových plynů ($\kappa = 1,4$) výtoková funkce konstantní: $\psi = 0,484$

výtoková funkce pro nakritické proudění	Ψ	= 0,484	[-]
absolutní tlak $p_1 + p_2$	P_{abs}	= 1 601 325	[Pa]
atmosférický tlak (smluvní hodnota)	P_2	= 101 325	[Pa]
kritický poměr tlaků		= 0,528	[-]
Izoentropický exponent dvouatomových plynů	κ	= 1,4	[-]

V případě podkritického proudění se výtoková funkce vypočítá podle vzorce:

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1+\kappa}{\kappa}} \right]} \quad (9.5)$$

d) Výpočet hmotnostního průtoku

$$Q_h = S \cdot \psi \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot P_{abs} \cdot \rho_1} \quad (9.6)$$

$$Q_h = 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot 0,484 \cdot 0,94 \cdot \sqrt{2 \cdot (1500000 + 101325) \cdot 18,41}$$

$$Q_h = 0,010969 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

hmotnostní průtok	Q_h	= ?	[kg.s ⁻¹]
průřez trysky:	S	= $3,14 \cdot 10^{-6}$	[m ²]
výtoková funkce pro nadkritické proudění	Ψ	= 0,484	[-]
výtokový součinitel pro kuželovou trysku 10°	μ	= 0,94	viz kapitola 9.3.2
tlak plynu $P_{abs} = P_1 + P_2$	P_{abs}	= 1 601 325	[Pa]
hustota plynu při tlaku 15 bar	ρ_1	= 18,41	[kg . m ⁻³]

e) Přepočet hmotnostního průtoku na objemový

Hmotnostní průtok se vynásobí počtem sekund za hodinu a vydělí hustotou plynu za běžného atmosférického tlaku

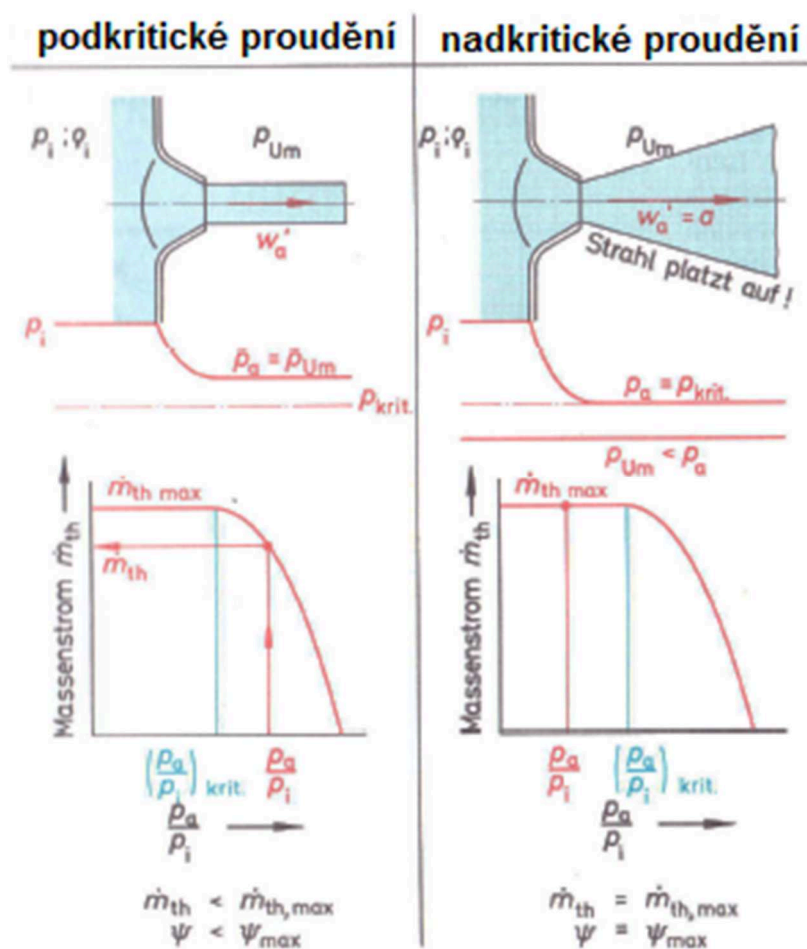
$$Q_o = \frac{Q_h \cdot 3600}{\rho_2} \quad (9.7)$$

$$Q_o = \frac{0,010969 \cdot 3600}{1,16} = 34,04 \text{ m}^3/\text{h}$$

objemový průtok	$Q_o = ?$	$[\text{m}^3/\text{h}]$
hmotnostní průtok	$Q_h = 0,01108$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
počet sekund za hodinu	$= 3600$	$[\text{s}]$
Hustota dusíku při běžném tlaku a teplotě 20°C	$\rho_2 = 1,16$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Spotřeba dusíku při tlaku 15 bar a při použití trysky HK o průměru 2 mm je 34 m³ za hodinu.

Obrázek zobrazuje chování plynu při podkritickém a nadkritickém proudění.



Obrázek 46: Podkritické a nadkritické proudění [15]

9.2.2 Původní nastavení tlaku

Při hodnocení používaných tlaků je překvapivé, že u nejslabších plechů je tlak 12 bar. V odborné literatuře se uvádí, že vysokotlaké řezání nerezových plechů začíná na tlaku 8 bar. Se vzrůstající tloušťkou plechu by měl růst i tlak plynu, ale v tomto případě neroste, ale kolísá.

<i>Tabulka 15: Původní nastavení tlaku dusíku při řezání AISI 304</i>	
tloušťka materiálu [mm]	tlak plynu [bar]
1 -2	12
3	11
4	14
5 - 6	15
10	14

Programátor si uvědomuje, že spotřeba plynu je enormní, ale z jeho pohledu je důležitá kvalita řezu. U plechu 1-5 mm s takto nastaveným tlakem dosahuje kvalitní řez, a proto tlak nesnižuje. Systematický pokus, který by určil optimální spotřebu plynu, obsluha neprováděla.

9.2.3 Pokus č. 2 – Nové nastavení tlaku

<i>Tabulka 16: Hodnocení řezu při změně tlaku plynu (síla materiálu: 4 mm) - pokus č. 2</i>			
ohnisko: +2		řezná rychlost: 2,5 m/min	
tlak plynu: pokus		výkon laseru: 100%	
průměr trysky: 2 mm		výška trysky od plechu: 1 mm	
vzorek	tlak plynu	hodnocení	známka
2 A	14	kvalitní řez bez otřepů	1
2 B	13	kvalitní řez bez otřepů	1
2 C	12	kvalitní řez bez otřepů	1
2 D	11	nepravidelné kapky kovu	3
2 E	10	otřepy na spodní hraně	4
2 F	9	otřepy na spodní hraně	5

Při řezání plechu o síle 4 mm jsem pozici ohniska zvolil dle nejlepšího výsledku z prvního pokusu na hladině 2. Postupně jsem řezal s nižším tlakem: 14; 13, 12, 11 až 9 bar, abych zjistil, jakým nejnižším tlakem lze řezat korozivzdorný materiál. Ostatní parametry jsem zachoval dle původního nastavení: průměr trysky 2 mm; řeznou rychlost 2,5 m/min; výkon laseru 100%, a výšku trysky 1 mm. Porovnával jsem otřepy na spodní hraně.

9.2.4 Hodnocení pokusu č. 2.

Při použití tlaku 14; 13; a 12 bar byly řezy bez otřepů. Při snížení tlaku na 11 bar se na hraně objevily kapky kovu. To byla známka, že s nižším tlakem bude klesat i kvalita. Tlak jsem přesto dál snižoval, abych mohl porovnat otřepy způsobené špatným ohniskem (obrázky v předchozí kapitole) a otřepy způsobené nízkým tlakem plynu.

Tímto pokusem jsem zjistil, že u 4 mm silného korozivzdorného plechu lze provést kvalitní řez s minimálním tlakem 12 bar. Rozdíl spotřeby od původního nastavení činí 4,3 m³ za hodinu.

<i>Tabulka 17: Snížení spotřeby dusíku při změně tlaku</i>					
	Ø trysky [mm]	Tlak N ₂ [bar]	Hustota N ₂ [kg. m ⁻³]	Průřez trysky [m ²]	Spotřeba [m ³ / hod]
původní nastavení	2	14	17,26	3,14×10 ⁻⁶	31,9
nové nastavení	2	12	14,96	3,14×10 ⁻⁶	27,6



Obrázek 47: Vzorek 2 F – Tlak plynu 9 bar- tlak plynu snížený 3 bar pod optimální hodnotu

9.3 Parametr č. 3 – Nastavení průměru trysky

Z ekonomického hlediska je průměr trysky velmi významný parametr. Průměr trysky by teoreticky mohl být rovný šířce řezné spáry, která je při optimálních řezných podmínkách u slabých plechů 0,2 mm až po 0,5 mm u silných plechů. V praxi se ale používá průměr trysky větší, protože malý průměr se snadno znečistí kapkami roztaveného kovu a znemožní řezání. Používají se průměry trysek v rozmezí 0,8 mm – 3 mm. [1, 8]

<i>Tabulka 18: Doporučené průměry trysek při vysokotlakém řezání dusíkem [12]</i>				
tloušťka materiálu [mm]	Doporučený \varnothing trysky [mm]	Používaný \varnothing trysky [mm]	Dop. vzdálenost trysky od plechu [mm]	Předpokládaná šířka spáry [mm]
1	1,5	1,5	0,6	0,15
2	1,5	1,5	0,7	0,15
3	1,75	1,75	0,7	0,15
4	1,75	2	0,7	0,2
5	2	2	0,7	0,2
6	2,5	2,5	0,8	0,2
10	3	3	0,8	0,5

9.3.1 Původní nastavení průměru trysky

Průměr používaných trysek se téměř shoduje s doporučením uvedeným v návodu ke stroji. Výjimku tvoří materiál o tloušťce 4 mm, kde se používá průměr 2 mm oproti doporučenému \varnothing 1,75 mm. Programátor tuto změnu provedl, aby docílil kvalitní řezné hrany bez otřepů.

Obsluha stroje při hledání optimálního nastavení mění řezné parametry systémem pokus - omyl. Provedenou změnu vyhodnocuje na základě kvality řezu. Protože stroj nemá průtočný měřák dusíku a obsluha spotřebu neumí vypočítat, tak nedokáže zhodnotit, jaké ekonomické dopady změna průměru trysky přináší. Vzorce uvedené v kapitole 9.2.1 umožňují tuto kalkulaci provést.

Zvětšení průměru z 1,75 mm na průměr 2 mm při stálém tlaku 14 bar zvýší hodinovou spotřebu o 7,5 m³. Při ceně 139 Kč za m³ je to ztráta 1043 Kč za hodinu.

<i>Tabulka 19: Zvýšení spotřeby dusíku při změně průměru trysky, tlak 14 bar</i>					
Tloušťka [mm]	\varnothing trysky [mm]	Tlak N ₂ [bar]	Hustota N ₂ [kg . m ⁻³]	Průřez trysky [m ²]	Spotřeba [m ³ / hod]
4	1,75	14	17,26	2,4×10 ⁻⁶	24,39
4	2	14	17,26	3,14×10 ⁻⁶	31,9

V případě nekvalitního řezu je výhodnější zvyšovat tlak plynu než zvyšovat \varnothing trysky. Při použití doporučeného \varnothing 1,75 mm je zvýšení tlaku ze 14 na 18 bar stále ekonomicky příznivější, než zvýšení \varnothing trysky na 2 mm. Postupné zvyšování tlaku dává větší možnost regulace průtoku plynu, a tedy i větší možnost ovlivnit ekonomické náklady řezání. Následující tabulka udává zvýšení spotřeby plynu při zachování \varnothing trysky, ale při vzrůstajícím tlaku plynu.

<i>Tabulka 20: Zvýšení spotřeby dusíku při změně tlaku, průměr trysky 1,75 mm</i>					
Tloušťka [mm]	\varnothing trysky [mm]	Tlak N ₂ [bar]	Hustota N ₂ [kg . m ⁻³]	Průřez trysky [m ²]	Spotřeba [m ³ / hod]
4	1,75	14	17,26	2,4×10 ⁻⁶	24,39
4	1,75	15	18,41	2,4×10 ⁻⁶	26,00
4	1,75	16	19,56	2,4×10 ⁻⁶	27,62
4	1,75	17	20,71	2,4×10 ⁻⁶	29,26
4	1,75	18	21,86	2,4×10 ⁻⁶	30,87
4	1,75	19	23,01	2,4×10 ⁻⁶	32,49

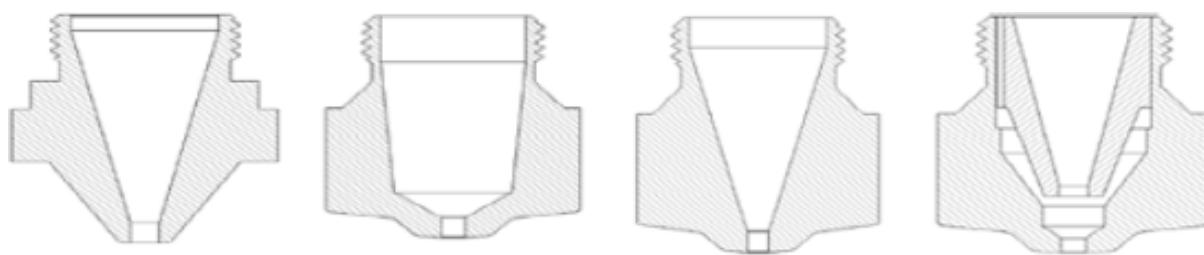
Ještě výraznější rozdíly ve spotřebě dusíku způsobuje záměna trysek \varnothing 2 a \varnothing 2,5 mm. Firma při řezání plechu o tloušťce 5 mm a 6 mm používá shodně tlak plynu 15 bar. U tloušťky 5 mm používá podle doporučení výrobce \varnothing trysky 2 mm, u plechu o síle 6 mm používá \varnothing trysky 2,5 mm. Rozdíl ve spotřebě činí 19 m³ za hodinu, tzn. 2 641,- Kč/hod.

<i>Tabulka 21: Zvýšení spotřeby dusíku při změně průměru trysky, tlak 15 bar</i>					
Tloušťka [mm]	\varnothing trysky [mm]	Tlak N ₂ [bar]	Hustota N ₂ [kg . m ⁻³]	Průřez trysky [m ²]	Spotřeba [m ³ / hod]
5	2	15	18,41	3,14×10 ⁻⁶	34,01
6	2,5	15	18,41	4,9×10 ⁻⁶	53,1

9.3.2 Tvar geometrie trysky

Kuželové trysky se používají ke zvýšení kinetické energie proudícího plynu a k zajištění rovnoměrného rozložení tlaku plynu v řezné drážce. Průřez trysky se zmenšuje plynule, aby nedošlo ke vzniku turbulencí.

Firma při řezání dusíkem používá trysky s označením HK. Zúžení trysky klade odpor proudícímu plynu a tím ovlivňuje konečnou spotřebu média. Tento vliv lze specifikovat několika součiniteli. Pro výpočet hmotnostního průtoku se počítá pouze se součinitelem výtokovým, což je součin součinitele rychlostního a součinitele zúžení.



Tryska H

tryska K

tryska HK

tryska NK

Obrázek 48: Používané tvary trysek [56]

Tabulka 22: Součinitele kuželové trysky HK [54]			
výtokový součinitel	rychlostní součinitel	součinitel zúžení	ztrátový součinitel
μ	φ	ε	ζ
0,94	0,96	0,98	0,09

rychlostní součinitel se vypočítá podle vzorce:
$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} \quad (9.8)$$

výtokový součinitel se vypočítá podle vzorce:
$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon \quad (9.9)$$

9.3.3 Pokus č. 3 - Řezání s menším průměrem trysky

Šířka řezné spáry se při optimálních řezných podmínkách pohybuje v rozmezí 0,2 - 0,5 mm. V případě použití trysky \varnothing 2 mm je její velikost čtyřnásobná vzhledem k řezné drážce. Lze předpokládat, že část plynu není efektivně využita, protože na odstranění taveniny z drážky se podílí jen ta část plynu, která do ní vstupuje.

Abych zjistil, zda je možné provést kvalitní řez z menším průměrem trysky a docílit tak úspory dusíku, tak jsem provedl následující pokus. Nejprve jsem použil trytku podle původního nastavení \varnothing 2 mm. Ohnisko bylo nastaveno na základě prvního pokusu na hladinu 2; tlak podle druhého pokusu na úroveň 12 bar. Posuv, výkon stroje i výška trysky od plechu zůstaly na původních hodnotách.

Pro další řez jsem zvolil průměr trysky 1,75 mm (podle doporučení výrobce stroje). Aby došlo k úspoře dusíku vzhledem k původnímu nastavení, tak u trysky \varnothing 1,75 mm nesmí tlak přesáhnout 18 bar. Provedený řez byl bez otřepů. Při následných řezech jsem snížil tlak na 15 bar a poté na 12 bar. Řezy byly rovněž kvalitní. Provádět další řezy s nižším tlakem by nemělo smysl, protože z pokusu č. 2 vím, že při dané tloušťce plechu je minimální tlak 12 bar.

Programátor oponoval, že při menším průměru trysky se rychlost proudění zvětšila, a proto bych tlak mohl ještě snížit. Jak je uvedeno v příloze C, průměr trysky při nadkritickém proudění na rychlost plynu nemá vliv. Jeho rychlost je konstantní 316 m/s.

Následně jsem použil trysku s průměrem 1,5 mm. Menší tryska se vystavuje riziku zalepení roztaveným kovem, a proto by bylo vhodné trysku posunout výše od plechu. Při změně dalšího parametru by však pokus ztrácel svoji porovnávací hodnotu. Proto tryska zůstala ve vzdálenosti 1 mm. Další riziko představuje, že u trysky s malým otvorem může dojít k potížím se sbíháním plynu, což vede k hrubšímu řezu.

Při použití trysky o průměru 1,5 mm mohu použít tlak 24 bar a stále dojde k úspoře dusíku vzhledem k původnímu nastavení. Několik řezů se však nepodařilo, protože stroj vysokou hodnotu plynu neakceptoval. Nejvyšší tlak, který stroj dokázal vyvinout, je 19 bar. Provedený řez měl na hraně nepravidelné krupičky (obrázek vzorek 3 E). Domnívám se, že vysokým tlakem plynu mohlo dojít k ochlazení řezu, a proto jsem tlak snížil. Při tlaku 16 bar byl řez bez otřepů, při řezání s tlakem 13 bar se objevil lehce odstranitelný otřep. Následně jsem zvýšil tlak na 15 bar, na hraně však byly stále nepatrné otřepy. Konečné nastavení plynu zůstalo na tlaku 16 bar; průměr trysky 1,5 mm.

<i>Tabulka 23: Hodnocení řezu při změně průměru trysky (síla mat.: 4 mm) - pokus č. 3</i>			
ohnisko: +2		řezná rychlost:	2,5 m / min
tlak plynu: pokus		výkon laseru:	100%
průměr trysky: pokus		výška trysky od plechu:	1 mm
vzorek	průměr trysky a tlak plynu	hodnocení	známka
3 A	∅ 2 mm 12 bar	kvalitní řez bez otřepů	1
3 B	∅ 1,75 mm 18 bar	kvalitní řez bez otřepů	1
3 C	∅ 1,75 mm 15 bar	kvalitní řez bez otřepů	1
3 D	∅ 1,75 mm 12 bar	kvalitní řez bez otřepů	1
3 E	∅ 1,5 mm 19 bar	nepravidelné kapky na hraně	3
3 F	∅ 1,5 mm 16 bar	kvalitní řez bez otřepů	1
3 G	∅ 1,5 mm 13 bar	otřepy na spodní hraně	2
3 H	∅ 1,5 mm 15 bar	otřepy na spodní hraně	2

9.3.4 Hodnocení pokusu č. 3

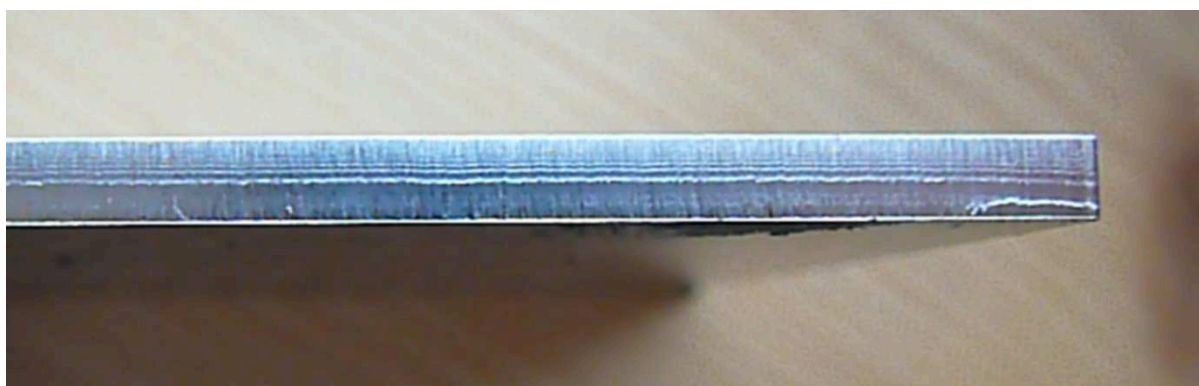
Pokus číslo 3 prokázal, že při řezání plechu o síle 4 mm je zbytečné používat větší průměr trysky, než je doporučení výrobce, naopak je vhodné použít menší průměr, protože dojde ke zlevnění výroby při zachování kvality řezu. Stejně jakosti řezu jsem dosáhl při použití průměru 2 mm; 1,75 mm; 1,5 mm. Snížení hodinové spotřeby plynu v závislosti na průměru trysky je uvedeno v tabulce.

Tabulka 24: Snížení spotřeby dusíku způsobené poklesem tlaku i zmenšením \varnothing trysky

Popis činnosti	Číslo vzorku	\varnothing trysky [mm]	Tlak N ₂ [bar]	Hustota N ₂ [kg.m ⁻³]	Průřez trysky [m ²]	Spotřeba [m ³ / hod]
Původní nastavení	1 A	2	14	17,26	3,14×10 ⁻⁶	31,9
Snížení tlaku	2 C	2	12	14,96	3,14×10 ⁻⁶	27,6
Snížení \varnothing na 1,75	3 D	1,75	12	14,96	2,4×10 ⁻⁶	21,14
Snížení \varnothing na 1,5	3 F	1,5	16	19,56	1,76×10 ⁻⁶	20,27



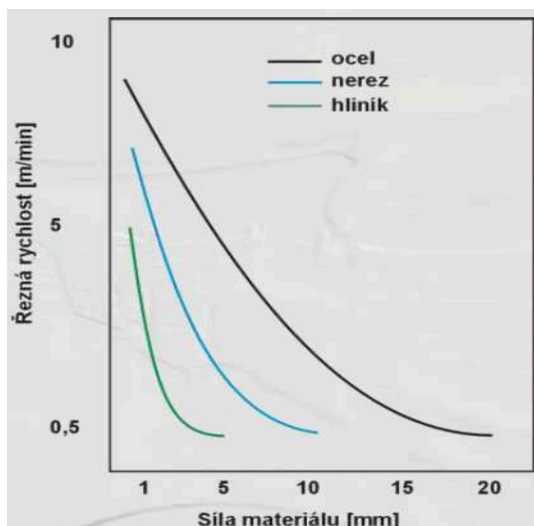
Obrázek 49: Vzorek 3 E - Průměr trysky 1,5 mm - tlak plynu 19 bar



Obrázek 50: Vzorek 3 F - Průměr trysky 1,5 mm, tlak plynu 16 bar -nejvyšší úspora plynu

9.4 Parametr č. 4 - Nastavení řezné rychlosti

Rychlost posuvu je pohyb mezi nástrojem, tj. řezacím hořákem, a obrobkem. Chybně zvolena rychlost řezání vede k velmi vysoké drsnosti, otřepům a k nekvalitnímu řezu. S vyšší rychlostí řezání lineárně roste i potřebný výkon laseru. Profesor Mrňa prezentoval graf [35], kde jsou vyznačeny dosahované řezné rychlosti v závislosti na druhu a síle materiálu.



Obrázek 51: Řezné rychlosti při řezání laserem. [35]

Na hodnoty v grafu se nelze dívat jako na doporučené, ale pouze jako na „možné“. Graf neuvádí, jakým výkonem bylo řezné rychlosti dosaženo. Domnívám se, že graf znázorňující řeznou rychlost by měl uvádět i výkon laseru. Stroj s výkonem 3 kW dosahuje menší řezné rychlosti než s výkonem 4 kW; 5 kW; atd. Pro laser z vysokým výkonem je graf podhodnocený.

9.4.1 Původní nastavení řezné rychlosti

Tabulka 25: Původní nastavení řezné rychlosti		
materiál [mm]	řezná rychlost [m/min]	Výkon laseru
1	9	90 % (2700 W)
2	6,2	95 % (2850 W)
3	3,8	100% (3000 W)
4	2,5	100%
5	2	100%
6	1,375	100%
10	0,45	100%

Řezné rychlosti používané firmou jsou podobné s hodnotami uvedenými v grafu. Výjimku tvoří materiál síly 1 mm, kde graf uvádí hodnotu 7 m/min, ale firma řezá rychlostí 9 m/min.

Jestliže je však při vyšší rychlosti kvalita řezné hrany dobrá, tak není důvod řeznou rychlost snižovat. Je naopak výhodné otestovat maximální řeznou rychlost u každé tloušťky materiálu.

9.4.2 Pokus č. 4 - Řezání s vyšší řeznou rychlostí

Parametry, na kterých už byl proveden pokus, jsem nastavil podle nejlepších zjištěných hodnot z předchozích pokusů: ohnisko 2; tlak plynu 16 bar; průměr trysky 1,5. Zbývající parametry jsem zachoval dle původního nastavení: výkon 100%; výška trysky 1 mm.

Tabulka 26: Hodnocení řezu při změně řezné rychlosti (síla mat.: 4 mm) - pokus č. 4			
ohnisko: +2		řezná rychlost: pokus	
tlak plynu: 16 bar		výkon laseru: 100%	
průměr trysky: 1,5 mm		výška trysky od plechu: 1 mm	
vzorek	řezná rychlost	hodnocení	známka
4 A	2,8	otřep a natavené kapky kovu	5
4 B	2,7	otřep a natavené kapky kovu	5
4 C	2,6	otřepy na spodní hraně	3
4 D	2,5 max. možná rychlost	kvalitní řez bez otřepů	1

9.4.3 Hodnocení pokusu č. 4

Řeznou rychlost jsem z 2,5 m/min skokově zvýšil na 2,8 m/min. Ukázalo se, že to byla špatná strategie. Plech má při této rychlosti na spodní hraně dvou milimetrové otřepy. Rychlost jsem postupně snížil na výchozí hodnotu 2,5 m/min. Výsledkem pokusu je, že materiál o síle 4 mm nelze řezat vyšší rychlostí než 2,5 m/min při 100% výkonu 3 kW rezonátoru.



Obrázek 52: Vzorek 4 A - rychlost posuvu 2,8 m/min

9.5 Parametr č. 5 - Nastavení výkonu laseru

Dodávaná energie je uváděna jako procentuální podíl z maximálního výkonu laseru, například 50% z 3 kW = 1500 W. Kolísání výkonu v rozmezí -10 % až +30 % kolem optimální hodnoty zaručuje kvalitní řez. Tepelně ovlivněná oblast je při správném výkonu relativně malá. Její velikost je 0,05 - 0,2 mm. U nízkouhlíkových a ušlechtilých ocelí se v tepelně ovlivněné zóně mírně zvýší tvrdost, u hliníkových slitin se tvrdost naopak sníží. V případě příliš vysokého výkonu se zvětší tepelně ovlivněná zóna a vzniknou větší otřepy na spodní straně řezu. Při nedostatečném výkonu nedojde k potřebnému prořezání materiálu. [1,12]

Při pálení ostrých rohů, malých otvorů nebo drobných detailů, je nutné snížit výkon, aby dodaná energie byla srovnatelná s energií dodanou na rovné straně dílce. Některé stroje mají funkci Laser Duty, která snížení výkonu v problematických místech provede automaticky. [1,12]

Teorie o nastavení výkonu

Většina literatury udává, že výkon je přímo úměrný tloušťce materiálu tzn., že slabé plechy se řezou malým výkonem a silné plechy velkým výkonem, a to z důvodu, že řezání s příliš vysokým výkonem tvoří širší řeznou drážku a větší TOO. S tím souvisí, že z širší drážky je nutné odstranit větší objem taveniny, takže je větší i spotřeba dusíku.

Proti tomuto tvrzení stojí názor, že potenciál stroje se má využít na maximum, a proto je vhodné řezat vždy na 100% výkon a podle tloušťky materiálu zvyšovat nebo snižovat pouze rychlost posuvu.

9.5.1 Původní nastavení výkonu

Tabulka 27: Původní nastavení výkonu			
materiál [mm]	výkon laseru	řezná rychlost [m/min]	šířka spáry [mm]
1	90 %	9	0,15
2	95 %	6,2	0,15
3	100 %	3,8	0,15
4	100 %	2,5	0,2
5	100 %	2	0,2
6	100 %	1,375	0,2
10	100 %	0,45	0,5

Programátor firmy zastává názor o maximálním využití stroje, protože materiál o síle 1 mm řeže výkonem nastaveným na 90% (2700 W) a od tloušťky 3 mm řeže vždy na 100%.

Objektivně hodnotit nastavení výkonu není možné. Optimální nastavení výkonu není popsáno v dostupné literatuře, protože výkon paprsku se může lišit podle kvality plynové náplně rezonátoru, podle stavu zrcadel a optické cesty, atd. Nastavení výkonu se vždy provádí pokusem.

9.5.2 Pokus č. 5 : Vliv snížení výkonu

S cílem zjistit, v jakém rozsahu je možné měnit výkon stroje, který má 3 kW rezonátor, jsem provedl pokus, kdy jsem výkon z původních 100% snížil na 90 %. Ostatní parametry jsem nastavil podle předešlých pokusů: ohnisko 2; tlak plynu 16 bar; průměr trysky 1,5; řezná rychlost 2,5 m/min. Výška trysky zůstala na původní hodnotě 1 mm.

Tabulka 28: Hodnocení řezu při změně výkonu (síla materiálu: 4 mm) - pokus č. 5			
ohnisko: +2		řezná rychlost: 2,5 m / min	
tlak plynu: 16 bar		výkon laseru: pokus	
průměr trysky: 1,5 mm		výška trysky od plechu: 1 mm	
vzorek	výkon stroje	hodnocení	známka
5 A	100%	Kvalitní řez bez otřepů	1
5 B	90%	Nebyl prořezán	-

9.5.3 Hodnocení pokusu č. 5

Porovnávací řez nebyl proveden, protože výkon laseru nestačil k prořezání plechu. Pokus prokázal, že při tloušťce materiálu 4 mm a při řezné rychlosti 2,5 m/min je 100% výkon optimální (a nutný).

Pokusy s řeznou rychlostí a výkonem stroje lze vyhodnotit tak, že při dělení korozivzdorné ocele o síle 4 mm není příliš velký prostor pro nastavení výkonu laseru, který má 3 kW rezonátor. Domnívám se, že výkon by měl mít hodnotu vždy 100% a tomuto nastavení přizpůsobit řeznou rychlost. V podstatě to znamená, že ze dvou navzájem ovlivňujících se parametrů by se nastavoval jenom jeden. Konstantní nastavení výkonu na 100% by zjednodušilo hledání optimálních řezných parametrů. Lze tedy doporučit, aby programátor při dělení plechu o tloušťce 1 a 2 mm, které řeže výkonem 90 a 95 %, požadovaný výkon zvedl na maximum a současně s tím zvýšil i řeznou rychlost přibližně na 10 m /min až 11 m /min.

9.6 Parametr č. 6: Nastavení vzdálenosti trysky od plechu

Nastavení trysky se mění v závislosti na: Poloze ohniska

Tlaku plynu a požadovaném objemu průtoku

Druhu detekce

Šířce řezné drážky a tloušťce řezaného materiálu

Vzdálenost mezi tryskou a plechem má být v takové vzdálenosti, aby plyn efektivně pracoval v řezné drážce, ale zároveň tak daleko, aby tryska nebyla znečištěna odlétajícím roztaveným kovem. Obecně platí, že při velké vzdálenosti klesá kvalita řezu, a při malé vzdálenosti hrozí zašpinění a opotřebení trysky. Čištění trysky probíhá automaticky. Řezací hlava mezi jednotlivými řezy několikrát projede po kartáči, který je umístěn na rámu stroje.

U oxidačního řezání se tryska nastavuje dále od plechu ve vzdálenosti 1 - 2,5 mm, protože v proudícím kyslíku vzniká exotermická reakce. Tryska pro přivedení netečných plynů se umísťují blíže plechu v rozmezí 0,3 - 1 mm. U trysky HK při použití dusíku dodavatel stroje doporučuje vzdálenost od plechu v rozmezí 0,6 - 0,8 mm. [2,12]



Obrázek 53: Nastavení vzdálenosti trysky od plechu [55]

Centrování laserového paprsku v trysce

Optimální kvalita řezu je z velké části závislá na tom, zda je paprsek správně vycentrovaný s osou trysky. Pokud plyn proudí částečně mimo řez, vznikají otřepy na jedné straně řezu a vzniká i různá velikost tepelně ovlivněné zóny na obou stranách řezu. Centrování se provádí propalem na lepicí pásce.

Písmeno A označuje průměr paprsku, písmeno B označuje průměr trysky.



Obrázek 54: Dobře a špatně vycentrovaná tryska[12]

9.6.1 Původní nastavení trysky

Vzdálenost trysky od plechu obsluha při původním nastavení parametrů neznala a ani netušila, že se vzdálenost trysky od plechu nechá měnit. Při všech pokusných řezech byla tryska ve vzdálenosti 1 mm od plechu.

9.6.2 Pokus č. 6: Vliv vzdálenosti trysky od plechu na kvalitu řezu

Výška trysky od plechu se nastavuje jako poslední v pořadí, protože ovlivňuje řez nejméně ze všech parametrů. Provedl jsem dva kontrolní řezy, při kterých jsem parametry nastavil na základě předchozích pokusů. Rozdíl byl pouze v umístění trysky. Při prvním řezu byla tryska ve vzdálenosti 1 mm, při druhém podle doporučení výrobce stroje ve vzdálenosti 0,7 mm.

Tabulka 29: Hodnocení řezu při změně výšky trysky (síla materiálu: 4 mm) - pokus č. 6			
ohnisko: +2		řezná rychlost: 2,5 m / min	
tlak plynu: 16 bar		výkon laseru: 100%	
průměr trysky: 1,5 mm		výška trysky od plechu: pokus	
vzorek	výška trysky od plechu	hodnocení	známka
6 A	1 mm	kvalitní řez bez otřepů	1
6 B	0,7 mm	kvalitní řez bez otřepů	1

9.6.3 Hodnocení pokusu č. 6

Oba řezy byly kvalitní a pouhým okem od sebe nerozeznatelné. Pro zjištění vlivu vzdálenosti trysky od plechu by bylo možné provést měření drsnosti povrchu. Protože firma o měření neměla zájem a bylo by to i nad požadovaný rozsah práce, tak měření nebylo provedeno.



Obrázek 55: Vzorek 6 B: výška trysky 0,7 mm- optimální nastavení

10. Závěr

Tato diplomová práce si kladla za cíl snížit finanční náklady nutné k nákupu dusíku, který je nezbytný při tavném laserovém řezání korozivzdorné oceli. K požadované úspoře vedou dvě cesty. První možnost je změnit třídu čistoty dusíku, respektive způsob dopravy a skladování plynu, druhá možnost je snížení nákladů nalezením optimálních řezných podmínek.

Při dodržení doporučené čistoty dusíku třídy 5.0 je nejvýhodnější dodávat plyn v kryogenní nádobě namísto svazku lahví. Docílí se tak finanční úspory 80%.

V případě, že by i nadále byly používány svazky tlakových lahví, tak je vhodné zvolit levnější dusík s nižší třídou čistoty, která však stále zaručuje bezoxidační řez. Jde o dusík třídy 4.0.

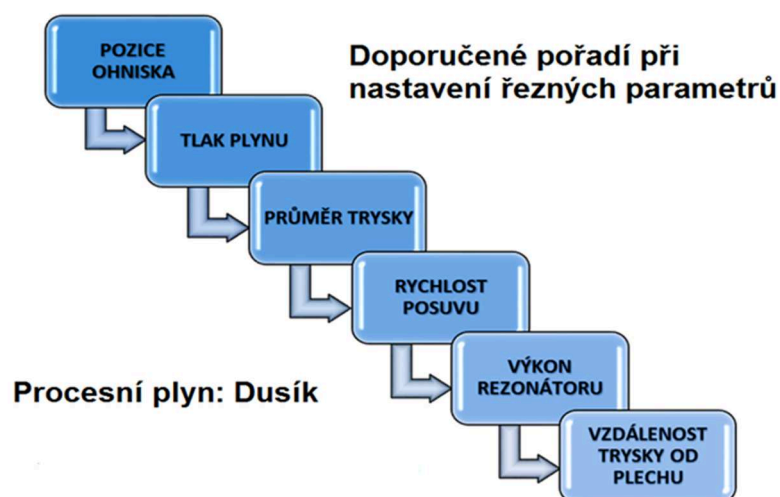
V případě velkého odběru dusíku, například při rozšíření provozu na tři směny, by bylo možné zakoupit generátor dusíku, který dodává dusík s nejpříznivější cenou. K jeho pořízení jsou ale nutné počáteční náklady cca 1.300 000 Kč.



Graf 3: Cena a čistota dusíku podle způsobu dodání

Pro hledání úspor při samotném řezání je zásadní nejdříve nalézt optimální řezné podmínky. Vznikl proto podrobný manuál, jak postupovat při nastavování řezných parametrů při tavném řezání. Tento návod je platný pro jakoukoliv tloušťku materiálu. Je nutné vyvarovat se náhodným zásahům do nastavení parametrů a postupovat přesně podle doporučeného pořadí (obrázek 56).

Teprve až po nalezení správné polohy ohniska je možné upravovat tlak a průměr trysky, a regulovat tak spotřebu plynu. Změna průměru trysky ovlivňuje celkovou spotřebu plynu několikanásobně více než změna tlaku.



Obrázek 56: Pořadí nastavení parametrů při tavném řezání

Při pokusech jsem ověřil, že lze řezat z menším průměrem trysky, a tedy snížit spotřebu dusíku. V tabulce je uvedeno původní nastavení a hodinová spotřeba plynu (vzorek 1 A). Postupnou úpravou tlaku jsem zjistil nejnižší možnou hodnotu, při které je kvalita řezu na přijatelné úrovni - tlak 12 bar (vzorek 2 C). Poté jsem použil trysku s průměrem 1,75 mm při zachování tlaku plynu 12 bar. Kvalita se proti předešlému řezu nijak nezměnila (vzorek 3 D). Následně jsem zvolil průměr trysky 1,5 mm; bylo ale nutné zvýšit tlak na 16 bar (vzorek 3 F).

Kvalitní řez bez otřepů u korozivzdorného materiálu o tloušťce 4 mm lze provést s tlakem plynu 16 bar a průměrem trysky 1,5 mm. Vzhledem k původnímu nastavení se jedná o úsporu více než 10 m³ dusíku za hodinu.

Tabulka 30: Snížení spotřeby dusíku způsobené poklesem tlaku i zmenšením \varnothing trysky

Popis činnosti	Číslo vzorku	\varnothing trysky [mm]	Tlak N ₂ [bar]	Spotřeba [m ³ /hod]
Původní nastavení	1 A	2	14	31,9
Snížení tlaku	2 C	2	12	27,6
Snížení \varnothing na 1,75	3 D	1,75	12	21,14
Snížení \varnothing na 1,5	3 F	1,5	16	20,27

Aby bylo možné hodnotit vliv průměru trysky a vliv tlaku plynu na celkovou spotřebu plynu, bylo nutné nalézt vhodný způsob výpočtu. Zdánlivě složitým výpočtem lze ale velmi jednoduše a rychle spočítat spotřebu plynu ještě před začátkem řezání. Toho lze využít při tvorbě nabídkových cen nebo při ekonomickém hodnocení jakékoliv technologie, která používá ochranné atmosféry z netečných plynů.

Q_h hmotnostní průtok

μ výtokový součinitel

S průřezu trysky

P_{abs} tlak plynu

$$Q_h = S \cdot \psi \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot P_{abs} \cdot \rho_1}$$

ψ výtoková funkce

ρ₁ hustota plynu

Seznam použitých zdrojů

- [1] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: ©VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, s 71-141. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [2] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: ©Technická univerzita Košice, Viena, 2000, s 167-219. ISBN 80-7099-430-4.
- [3] *Laser*. TECHMANIA SCIENCE CENTER. www.techmania.cz [online]. © 2008 [cit. 2015-10-20]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4b76616e746f76e12066797a696b61h&key=1093
- [4] KACHTÍK, Lukáš. *Princip laseru*. Lasery.wz.cz [online][cit. 2015-10-20] Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
- [5] *Laser i-learning*. LEONARDO TECHNOLOGY s.r.o. www.lt.cz [online]. © 2005 [cit. 2014-10-22]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning>
- [6] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I*. Přednáška č. 2: *Základní konstrukční součásti laserů*. [online]. Olomouc: Společná laboratoř optiky UP a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR, 2011 [cit. 2014-10-22]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/lt1_2prez.pdf
- [7] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II: 2 díl*. Ostrava: ©VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007-2008. ISBN 978-80-248-1822-1 Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~cep77/>
- [8] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilina: ©Žilinská univerzita v Žilině, 2001, s 101-178. ISBN 80-7100-853-2
- [9] *Kvantová a laserová elektronika*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. www.unium.cz. [online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: http://www.unium.cz/materialy/vut/tekt/zkouska_temata-m4486-p2.html
- [10] *What is laser?*. Physics World [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.phy.cuhk.edu.hk/phyworld/articles/laser/laser_e.html
- [11] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: © Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-718-3336-3.
- [12] BYSTRONIC CZECH REPUBLIC s.r.o. Bystar: *Manuál obsluhy* [CD]. Švýcarsko: © Bystronic Laser AG, 2002 [cit.2014-12-11]. verze: 10.
- [13] *Fyzikální princip laseru*. Radiobiologie. www.fbmi.sirdik.org. [online]. [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/8-kapitola/82/821.html>
- [14] *Polarizace*. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, © 2001, 28. 2. 2015 [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Polarizace_%28elektrodynamika%29
- [15] BOHL, W.: *Technische Strömungslehre*. Würzburg : VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1984, 275 s. 6. vydání, Bestellnummer: 547- 066-3

- [16] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I*. Přednáška č. 5: *Vedení laserového svazku*. [online]. Olomouc: Společná laboratoř optiky UP a Fyzikálního ústavu AV ČR, ©2011 [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/lt1_5prez.pdf
- [17] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I*. Přednáška č. 3: *Plynové lasery pro průmyslové využití*. [online]. Olomouc: Společná laboratoř optiky UP a Fyzikálního ústavu AV ČR, ©2011 [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/lt1_3prez.pdf
- [18] *Flat top / Beam shaping application notes* - Diffractive optics. HOLO/OR LTD. [online]. Rechovot, ISRAEL, ©2005 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.holoor.co.il/Diffractive_optics_Applications/Application_Notes_BeamShapers.htm
- [19] BOUCHAL, Zdeněk. *Svazková optika*. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky. [online]. [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_SO.pdf
- [20] TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Laser processing: CO2 laser*. Ditzingen, ©2007. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
- [21] *Polarized Light*. Honors physics . [online]. [cit. 1970-01-01]. Dostupné z: http://www.district196.org/avhs/dept/science/acc_physics/pages/polarized.html
- [22] *Circular dichroism*. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, ©2001, 6 March 2015 [cit. 2014-12-04]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Circular_dichroism
- [23] *Intro to Lasering*. ROWMARK LLC. www.rowmark.com [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.rowmark.com/mark/laser_guide/pages/Intro.asp
- [24] PALANKER, Daniel. *Basic Laser Properties*. One network [online]. © 28.10.2013 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://one.aao.org/munnerlyn-laser-surgery-center/basic-laser-properties>
- [25] *Tabulky → spektrum → viditelné*. ALDEBARAN GROUP FOR ASTROPHYSICS. www.aldebaran.cz [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/tabulky/spektrum_vis.php_obrazek_hranolu
- [26] *Fyzikální parametry paprsku laseru*. THERAPY SYSTEMS s.r.o. www.therapy.cz. [online]. ©2009 [cit. 2015-02-09]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/fyzikalni-parametry-laseru.php>
- [27] *Photograph Of Laser Beam*. www.gettyimages.com. [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.gettyimages.com/detail/photo/photograph-of-laser-beam-passing-through-a-high-res-stock-photography/128624553>
- [28] *The CO2 Laser Optics and Infrared*. II-VI INFARED. [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.iiviinfrared.com>
- [30] SPRING, Kenneth R. *Laser Systems for Confocal Microscopy*. Theory of Confocal Microscopy. [online]. © 2004-2009 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.olympusconfocal.com/theory/confocallaserintro.html>

- [31] *Fokusovatelnost a kvalita svazku*: 7. přednáška. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. [online]. © 14. 2. 2012 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://people.fjfi.cvut.cz/kubecvac/ORE/ORE%20Program%20přednášky.htm>
- [32] *Optické rezonátory*. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta strojní, Ústav fyziky. [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_10.pdf
- [33] STANĚK, Tomáš. *Metody Q spínání*. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. [online]. [cit. 2015-3-9]. Dostupné z: http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/fla/2013/referaty/Stanek_MetodyQswitch.pdf
- [34] MRŇA, Libor. *Dělení materiálů laserem*. Časopis Strojárstvo / Strojírenství [online]. [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/1308-dleni-material-laserem>
- [35] MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. [online]. [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv_specialni_metody_svarovani_rezani_laserem_2013_mrna.pdf
- [36] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. [online]. [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
- [37] JANATA, Marek a Pavel POLOMSKÝ. *Průmyslové lasery a jejich aplikace*. AIR PRODUCTS SPOL.s.r.o. [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/PrumLaser_2004.pdf
- [38] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování*. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI, Přírodovědecká fakulta. Portál moderní fyziky [online]. [cit. 2015-01-012]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
- [39] ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace*. AK LASER. www.aklaser.cz [online]. © 8. října. 2002 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://www.aklaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [40] ZLESÁK, Jakub. *Trendy vývoje Laserové technologie*: Diplomová práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. s.67 Vedoucí práce Ing. K. Osička [online]. [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6067
- [41] *Laserové a plazmové řezání*. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ -TU OSTRAVA, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie - 345 , Ústav svařování. [online]. [cit. 2015-02-012]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [42] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila, Marie ČÍŽKOVÁ, Tomáš ZMYDLENÝ a Tomáš KLIMEK. *Kyslík*. ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ. WWW. ČATP- Publikace. cz. [online]. Praha, ©Listopad 2006 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace2.php>
- [43] BERKMANN, Joachim a Mark FAERBER. *Laser cutting*. [online]. [cit. 2014-12-12]. Dostupné z: <http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl%5b1%5d.%20Drucklayout%2023.06.03.pdf>

- [44] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila, Zdena POJEZNÁ, Jan HAMERNÍK a Miroslav HOLUB. *Dusík*. ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ. WWW. ČATP- Publikace.cz [online]. Praha, © leden 2014 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace2.php>
- [45] KAŠPAR, Jan. *Laserové řezání: volba a vlastnosti asistenčních plynů*. MESSER TECHNOLOGAS s.r.o. [online]. © září 2014 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: http://www.messergroup.com/cz/Tisk/Archiv-2014/Laserove_rezani_volba_a_vlastnosti_asistencnich_plynu.pdf
- [46] MICHÁLEK, Karel a Karel GRYC. *Čistota a užité vlastnosti ocelí*. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TU OSTRAVA, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. [online]. ©2010 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/Opora_6180813-Cistota-a-uzitne-vlastnosti-oceli.pdf
- [47] *Tepelná vodivost*. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, ©2001, 3. 3. 2015 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná_vodivost
- [48] *Povrchové napětí*. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, ©2001, 28. 2. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchové_napětí
- [49] AHARON, Oren. *High power beam analysis*. Industrial laser solutions for manufacturing [online]. ©9.4.2013 [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-5/features/high-power-beam-analysis.html>
- [50] *Q-Switched Technology - Background*: Describes use of CO2 laser in fast pulsed mode in order to reduce HAZ. COHERENT INC. [online]. © 2015 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <https://www.coherent.com/products/?917/Q-Switched-Technology-Background>
- [51] KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery-Laserové řezání*. FIRMA LAO-PRŮMYSLOVÉ SYSTÉMY, s.r.o. [online]. 2011, 19. 02. 2013 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [52] *Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování a možné korozi*. ITALINOX. www.italinox.cz [online]. © 2013 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p2>
- [53] *Ako vysoko kvalitné optické šošovky optimalizujú laserový proces*. EUROLASER GMBH. <http://www.eurolaser.com/sk> [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://www.eurolaser.com/sk/products/system-components/optical-components/>
- [54] *Měření silového účinku vodního paprsku*. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TU OSTRAVA, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. [online]. [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_siloveho_ucinku_vodniho_paprsku.pdf
- [55] *Cutting Know-how for Amada Lasers*. AMADA AMERICA, Inc. www.amada.com [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [cutting knowhow v7 - Engineering.com](http://cutting.knowhow.v7-engineering.com)
- [56] *Laserové pálicí stroje: Ceník spotřebních dílů, čoček a příslušenství*. BYSTRONIC CZECH REPUBLIC S.R.O. BYSTAR. [online]. [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.katalog.apl-cutting.com/laser/bystronic.pdf>
- [57] *Měření jakosti povrchu*. SANDVIK COROMANT. www.sandvik.coromant.com [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx

- [58] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení-Klasifikace tepelných řezů: Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. ©Český normalizační institut, 2003
- [59] ROHAN, Pavel, Vít TUČEK, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Zdena POJEZNÁ. *Argon*. ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ. www.ČATP- Publikace.cz [online]. Praha, © říjen 2011 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace2.php>
- [60] SCHLÖGL, Martin. *Helium*. ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ. www.ČATP- Publikace.cz [online]. Praha, © leden 2010 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace2.php>
- [61] *Laser Fundamentals: Laser Theory And Operation*. DEPARTMENT OF CHEMISTRY. /www.chem.wvu.edu [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.chem.wvu.edu/dept/dept/tutorial/Laser_Safety_Training/laser_safety_intro.htm
- [62] FRAUENPREISS, Thorsten. *CO2 Lasers*. www.photonics.com [online] [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25155>
- [63] ELTAWAHNI, H. A, N. S. ROSSINI a M. DASSISTI. *Evaluation and optimization of Laser Cutting Parameters for Plywood materials*. [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://doras.dcu.ie/18196/1/NEWEvaluation_and_optimization_of_Laser_Cutting_Parameters_for_Plywood_materials.pdf
- [64] DOMINEC, Miroslav. *Dusík! (Díl II.)*. TG PNEU V.O.S. [online]. 25.5.2011 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: www.tgpneu.cz/vybaveni-servisu/cs/soubory.../uloz_soubor_55.html
- [65] *LaserGas generator*. OXIWISE. www.oxywise.com [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.oxywise.com/cs/products/laser-cutting-gas>
- [66] *Jaký je rozdíl mezi Nm³ and Sm³?* OXIWISE. www.oxywise.com [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.oxywise.com/cs/content/news/what-is-the-difference-between-nm3-and-sm3>
- [67] *Aktuální (průměrná) cena 1 kWh elektřiny*. www.Energie123.cz [online]. © 2011-2015 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>
- [68] *Oxygen and nitrogen: generating systems*. OXIWISE. www.oxywise.com [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.oxywise.com/uploads/files/oxywise.pdf>
- [69] *Kurs Eura*. www.kurzy.cz [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/kursy-men/nejlepsi-kursy/EUR-euro/>
- [70] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

Seznam příloh

Příloha A: Nabídková cena na generátor dusíku

Příloha B: Technické parametry laseru

Příloha C: Výpočet rychlosti proudění stlačeného dusíku